RESISTENCIA CONTRA LAS VACUNAS • EDAD DE LAS ESTRELLAS





Julio de 2001 Número 298

SECCIONES













SECCIONES





Portada: Expogràfic

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Eric O'Connell
8	Slim Films
9-10	Eric O'Connell
11	Jeff Johnson
12	Eric O'Connell
14-15	Hubble Heritage Team
17	Wolfgang Brandner, *Laboratorio de Propulsión a Chorro*/IPAC; Eva K. Grebel; You-Hua Chu y NASA
18	R. Michael Rich, Kenneth J. Mighell y James D. Neill, *Universidad de Columbia*; Wendy L. Freedman, *Carnegie Observatories* y NASA
19	Donald F. Figer, *Instituto de Ciencias para el Telescopio Espacial* y NASA
20	Travis A. Rector, Brenda Wolpa y George H. Jacoby, *Observatorio Nacional de Astronomía Optica*
21	Aaron Firth
22-23	Philip Howe
25	Philip Howe (*arriba*); J. P. Franc y J. M. Michel, LEGI/img (*centro*); ARL/Penn State and RTO/NATO (*abajo*)
26-29	Philip Howe
30	U. S. Navy/NUWC (*arriba*); Philip Howe (*abajo*)
38-43	Miguel Salmerón
45	XPlane
46	Miguel Salmerón
48-50	Cortesía de la Fundación Andy Warhol, Inc./Art Resource, NY (*dibujo*); Jelle Wagenar (*fotografía*)
51	©1943 The Presidents and Fellows of Harvard College, ©1971 Henry A. Murray (*pintura*); Jelle Wagenar (*fotografía*)
53	Jelle Wagenar
57	B. Coll, *Motorola Inc.*, *FPD-Division* (*a* y *b*); P. A. Serena, J. J. Sáenz, A. Correia y Tim Harper (*c*)
58	B. Coll, *Motorola Inc.*, *FPD-Division* (*a*); E. Huq, *Rutherford Appleton Laboratory, U.K.* (*b*)
59	B. Coll, *Motorola Inc.*, *FPD-Division* (*a*); autores (*b*)
60	S. Gómez-Moñivas, *Universidad Autónoma de Madrid*
61	Vu Thien Binh, *Universidad Claude Bernard de Lyon* y autores
62	B. Coll (*a*); autores (*b* y *c*)
63	M. I. Marqués, *Universidad Autónoma de Madrid*
64	S. Marcuccio, *Centrospazio, Italia* (*a* y *b*); Agencia Espacial Europea (*c*)
66	Jim Barr
68	Laurie Grace
69	Artic National Wildlife Refuge
70	David Fierstein (*dibujo*); Phillips Alaska, Inc. (*fotografías 1, 4, 5* y *6*); Judy Patrick (*2* y *3*)
73	Phillips Alaska, Inc.
75	Expogràfic
76	López García, Zahn, Riek y Wüthrich, ETHC/PNAS. vol. 97, pág. 8334 (*arriba*); Detlev Riesner y Thomas Braun (*abajo*)
77-78	Manfred Eigen, Göttingen
79	Spektrum der Wissenschaft/ Thomas Braun
80	Manfred Eigen
81-83	Jan Bieschke

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *Desarrollo de resistencia contra los antibióticos*; M.ª Rosa Zapatero: *La edad de las estrellas*; J. Vilardell: *Armas submarinas supercavitantes*, *Hace...*, y *Taller y laboratorio*; Luis Bou: *La red semántica* y *Aventuras matemáticas*; José Manuel García de la Mora: *El Rorschach y otros tests proyectivos*; Francesc Asensi: *Priones y encefalopatía espongiforme bovina*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

FIBRAS ARTIFICIALES. «En sólo quince años la industria textil se ha visto inundada de nailon, allón, vitrofibras, virón, orión y otros productos. De la invasión del rayón, los acetatos y el nailon no se ha salvado ningún guardarropa norteamericano y los usos técnicos y militares a los que se han adaptado estos y otros productos sintéticos forman legión. Se estima que en este año la producción mundial de fibras sintéticas alcanzará un total superior a los mil quinientos millones de kilogramos, lo que significa que han desplazado a la lana y ocupan un segundo puesto sólo superado por el algodón y el yute en la jerarquía de las materias primas textiles.»

LA COMPOSICIÓN DE UN COMETA. «A gran distancia del Sol el cometa estaría inactivo. Pero al aproximarse al Sol, el calor vaporizaría desde el estado sólido la materia que hubiera en la superficie del núcleo. Los gases desprendidos arrastrarían material meteorítico formando un chorro meteórico en la estela del cometa. Los propios gases sufrirían la acción de la radiación solar. La componente ultravioleta de ésta disociaría las moléculas de CH_4, NH_3 y H_2O en formas más simples. Esto explica por qué los espectros de los cometas no revelan la presencia de CH_4, NH_3 ni H_2O, pero sí muestran los *radicales* de esos compuestos: CH, CH_2, NH, NH_2 y OH.

—Fred L. Wipple.»

...cien años

SEGURIDAD DE ESTADO Y PROGRESO TÉCNICO. «Los inexplicables conservadurismo y arrogancia de las autoridades aduaneras turcas se pusieron recientemente de manifiesto con la prohibición de importar máquinas de escribir. La razón aducida por la autoridad es que, si se pusieran en circulación escritos sediciosos confeccionados por una máquina de escribir, sería imposible obtener pistas acerca del usuario de la máquina. Una gran consignación de 200 máquinas de escribir, que se hallaban en el edificio de la aduana cuando se aprobó esa ley, tendrán que ser devueltas.»

AUTOS DE CARRERAS. «Desde el punto de la distancia de 1190 km

a recorrer, la carrera de coches de motor París-Berlín fue la más interesante de las celebradas hasta la fecha, aunque no pueda decirse que sea la más importante para la industria, pues los vehículos participantes no eran de un tipo cuya fabricación sea deseable. Los vehículos de carreras, de una clase especial, se construyen para correr mucho, pero son peligrosos, poco fiables y caros. Nuestra ilustración muestra al ganador, Henri Fournier, y a su chófer cruzando la línea de meta en su automóvil Mors.»



Carrera de autos París-Berlín, 1901

...ciento cincuenta años

SUCIEDAD ESTADÍSTICA. «Las 300.000 casas de Londres están cruzadas por una red de calles según un promedio de unos 39 metros cuadrados por casa, una gran proporción de los cuales están pavimentados de granito. Más de doscientos mil pares de ruedas, con la ayuda de un número considerablemente alto de caballos herrados, no cesan de transformar en polvo ese granito, el cual se mezcla con dos a seis carretadas de excrementos de caballo por kilómetro de calle y por día, además de una cantidad desconocida de posos de hollín procedente de medio millón de humeantes chimeneas. Los olores y perfumes, casi los propios de un establo, del aire londinense, la rapidez con que se ensucian nuestras manos, nuestras ropas, las colgaduras de nuestras habitaciones y las vías de aire de nuestros pulmones testimonian sobradamente la realidad de este desastre.»

LAS MINAS DE ZABARAH. «En Egipto ha tenido lugar un interesantísimo descubrimiento. En el monte Zabarah, hay una mina de esmeraldas que se abandonó en los últimos años del reinado de Mehmet Alí. Una compañía inglesa ha reanudado su explotación, pues se cree que aún alberga piedras preciosas. El ingeniero de la compañía ha descubierto, a gran profundidad, rastros de una vieja galería, que data de la más remota antigüedad. Allí encontraron útiles arcaicos y una piedra grabada con signos jeroglíficos, ahora parcialmente desfigurados. Del examen de esa piedra parece desprenderse que los primeros laboreos en la mina comenzaron en el reinado de Sesostris el Grande, que vivió hacia el año 1650 antes de Cristo.»

Desarrollo de resistencia contra los antibióticos

El estudio de los mecanismos que intervienen en la adquisición bacteriana de resistencia contra los fármacos nos enseña a diseñar medicinas más eficaces

K. C. Nicolaou y Christopher N. C. Boddy



1. LOS BIOQUIMICOS BUSCAN la derrota de los enterococos resistentes a la vancomicina (*placa de petri a la derecha*). Esas bacterias medran ahora en presencia del antibiótico (*izquierda*).

Los responsables de la administración sanitaria y los médicos contemplan con temor fundado la creciente ineficacia de la farmacopea antibiótica. Uno tras otro, el doble centenar de antibióticos va quedando fuera de servicio, por inútil. Las bacterias que sobreviven se hacen más fuertes. Y se propagan. Cada vez hay más cepas resistentes a los antibióticos. La tuberculosis, la meningitis o la neumonía, infecciones que se combatían con antibiótico, no se curan con la facilidad de antaño. Aumenta el número de infecciones bacterianas de pronóstico quizá letal.

Las bacterias son agresores astutos. Además, les hemos dado, y les seguimos concediendo, lo que necesitan para su éxito asombroso. Con el uso inadecuado o abusivo de los antibióticos hemos fomentado la evolución de cepas superiores de bacterias. Así ocurre cuando no completamos una tanda de antibióticos, los usamos para una infección vírica o lo aplicamos a un mal inadecuado. Se calcula que entre un tercio y la mitad de los antibióticos recetados no eran necesarios. Un 70 por ciento de los antibióticos que se producen cada año en los Estados Unidos se administra al ganado. Agregamos antibióticos al líquido de las lavadoras y al jabón de manos. Con todo ello, lo único que conseguimos es que la bacteria débil muera y la fuerte se torne más vigorosa [*véase* “La resistencia contra los antibióticos”, por Stuart B. Levy; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1998].

Al margen de ese mal uso de la sociedad y de su abuso en clínica, el destino inevitable de los antibióticos es su presto envejecimiento. Las bacterias —que se multiplican a través de muchas divisiones celulares a lo largo del día— siempre aprenden algo nuevo; algunas de las más fuertes sobrevivirán y prosperarán. Buena razón ésta para ganarles en astucia.

En los últimos diez años, hemos salido por fin de la situación de complacencia en que nos hallábamos sobre el dominio de las infecciones. Laboratorios de titularidad pública y empresas farmacéuticas se han volcado en la investigación antibacteriana. Se ensayan todos los procedimientos imaginables para atacar a las bacterias y se multiplican los antibióticos que se preparan con la información obtenida en el estudio del genoma y de las proteínas.

Pero ni la investigación apasionante ni el desarrollo de fármacos constituyen ninguna panacea. Ahora bien, si se combinan con un uso razonable de los antibióticos pueden prestarnos ayuda. La oficina norteamericana sobre control de alimentación y fármacos (FDA) aprobó en abril del año 2000 el primer tipo nuevo de antibiótico clínico en 35 años; el linezolid. En lista de espera, o en fases previas, hay varios agentes más.

El desmantelamiento de la pared bacteriana

Casi todos los antibióticos que se han desarrollado hasta la fecha proceden de la naturaleza. Los científicos los han identificado y los han refinado, pero no los han creado. Desde el comienzo de la vida en nuestro planeta, los organismos han luchado por los limitados recursos que tenían a su disposición. De esa pugna surgió la evolución de los antibióticos. La capacidad de producir tales compuestos poderosos confiere a un organismo —hongo, planta u otra especie bacteriana— una ventaja sobre las restantes bacterias sensibles al antibiótico. En esa presión de selección se esconde el motor natural del desarrollo de los antibióticos.

Nos integramos en semejante carrera armamentística de los organismos con el descubrimiento de la penicilina en 1928. Alexander Fleming, del hospital clínico Santa María de la Universidad de Londres, advirtió que el moho *Penicillium notatum* mataba las bacterias *Staphylococcus* que crecían cercanas en agar en una placa de petri. Se había inaugurado el campo de los antibióticos. El análisis al azar de otros compuestos, procedentes o no de mohos, para averiguar si destruían bacterias o retardaban su desarrollo, llevó a la identificación de una amplia gama de antibióticos.

Entre los que han conocido mayor éxito se cuenta la vancomicina, identificada por los laboratorios Eli Lilly en 1956. El comprender su mecanismo de operación —una proeza que ha llevado más de tres decenios culminar— nos ha permitido adentrarnos en el mecanismo de acción de los antibióticos glicopéptidos, una de las siete clases principales. Se trata de un avance importante, por cuanto la vancomicina se ha convertido en el último recurso, el único fármaco eficaz que nos queda frente a la infección más letal que puede contraerse en el hospital: la del *Staphylococcus aureus*, resistente a la meticilina. Pero el poder de la vancomicina se encuentra en peligro.

La vancomicina ataca la pared bacteriana; ciñe ésta a la célula y su membrana, confiriéndole estructura y sostén. Ni la vancomicina ni otros fármacos afines dañan las células de humanos y mamíferos, que carecen de tal pared (poseen en cambio un citoesqueleto, una estructura interna que les da consistencia). La pared bacteriana consta fundamentalmente de peptidoglicanos, un material que, de acuerdo con su nombre, contiene péptidos y azúcares. A medida que la célula organiza este material —un proceso constante, porque todo peptidoglicano necesita reemplazarse cuando se degrada—, las unidades glucídicas se unen entre sí mediante la acción de la enzima transglucosidasa y forman una suerte de malla. En esta estructura, una de cada dos unidades de azúcar porta enlazada una cadena peptídica corta. Cada cadena peptídica posee cinco aminoácidos, de los cua-

Los autores

K. C. NICOLAOU y CHRISTOPHER N. C. BODDY han trabajado juntos en el Instituto Scripps de Investigación en La Jolla, California. Allí Nicolaou, autor de más de 500 publicaciones y poseedor de 50 patentes, dirige el departamento de química, donde Boddy se doctoró con una investigación sobre la síntesis de la vancomicina.

les los últimos son una L-lisina y dos D-alaninas. Se encarga la enzima transpeptidasa de reunir las cadenas peptídicas, eliminando la D-alanina final y uniendo la D-alanina penúltima a una L-lisina de una cadena de azúcares diferente. En razón de ello, las cadenas de glúcidos quedan amarradas mediante cadenas peptídicas. Todos estos enlaces cruzados tejen un material muy trenzado, esencial para la supervivencia de la célula; sin él, la célula estallaría por su propia presión interna.

La vancomicina se interpone en la formación de ese material decisivo. El antibiótico se halla cabalmente preparado para unirse a las cadenas peptídicas, antes de que éstas lo hagan entre sí por intervención de la transpeptidasa. El fármaco, al engarzarse en las D-alaninas terminales, evita que la enzima lleve a cabo su tarea. Sin la espesura de conexiones entrelazadas, el peptidoglicano se degrada, cual paño mal urdido. La célula se desgarra y muere.

Minando la resistencia

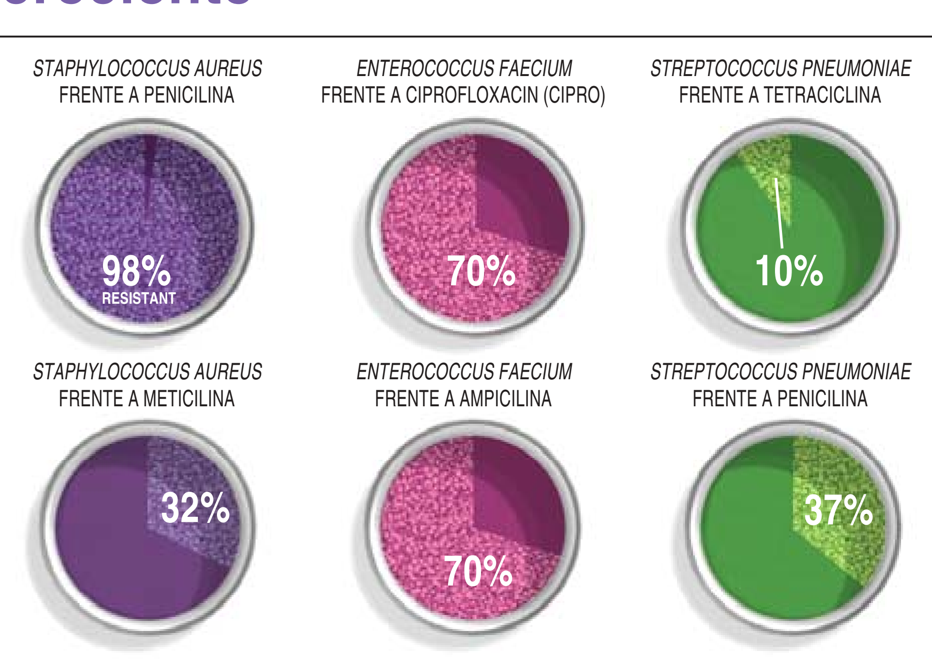
El encaje perfecto de la vancomicina en el extremo de la cadena peptídica resulta clave para su eficacia antibiótica. Por desgracia, su conexión peptídica es también decisiva para la resistencia bacteriana. En 1988 apareció un *S. aureus* resistente a la vancomicina en tres lugares distintos. Hay motivo para preocuparse de la posibilidad de expansión de las cepas, que dejarían sin tratamiento las infecciones letales de estafilococos.

Si conocemos el mecanismo de resistencia, podremos derrotarla. La investigación concentra ahora su atención en otra bacteria que, desde finales de los años ochenta, se sabe que es resistente a este fármaco poderoso: el enterococo resistente a la vancomicina (VRE). En la mayoría de las bacterias enterocócicas, la vancomicina cumple con su misión de unirse a las dos D-alaninas terminales. En el plano molecular, tal unión comporta la formación de cinco enlaces o puentes de hidrógeno, a la manera de cinco dedos que aprieten una pelota. Pero en la VRE la cadena peptídica difiere ligeramente. Aquí, la D-alanina final está alterada por una sustitución simple: un oxígeno reemplaza al par de átomos constituido por un nitrógeno unido a un hidrógeno. En términos moleculares, esta sustitución determina que la vancomicina se una a la cadena peptídica con sólo cuatro enlaces de hidrógeno. La pérdida de uno de estos enlaces genera la diferencia. Si son sólo cuatro los dedos que aprietan la pelota, el fármaco no puede aferrarse bien; las enzimas consiguen entrometerse y posibilitar que las cadenas peptídicas se unan de nuevo. Una mera sustitución atómica reduce en un factor de 1000 la actividad del medicamento.

Se han estudiado también otros antibióticos glicopeptídicos con la esperanza de observar si los hay con una estrategia que la vancomicina pudiera adoptar frente a los VRE. Se da la circunstancia de que algunos miembros de ese grupo de antibióticos poseen largas cadenas hidrofóbicas, muy útiles. Estas cadenas prefieren rodearse de otras moléculas hidrofóbicas, como las que constituyen la membrana celular, oculta tras el escudo peptidoglicano protector. Los investigadores de Eli Lilly, trabajando sobre esa pauta, han unido cadenas hidrofóbicas a la vancomicina y creado el análogo LY333328. El fármaco se adhiere a la membrana celular en concentraciones

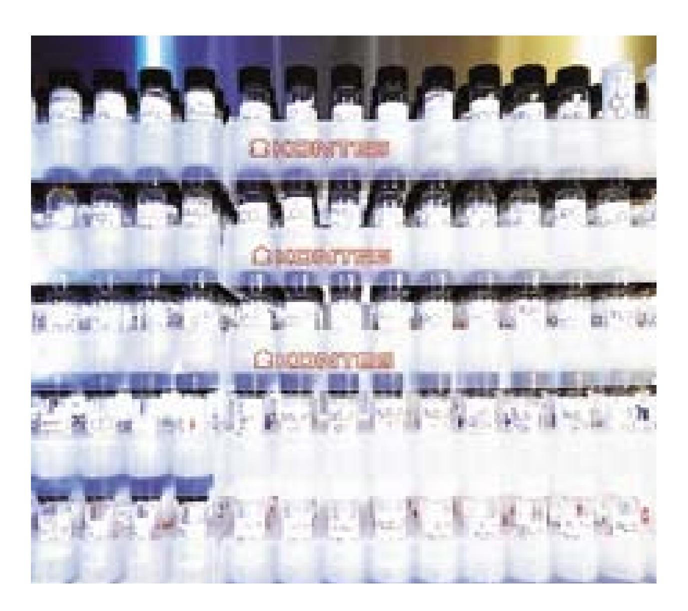
Resistencia creciente

MUCHOS ANTIBIOTICOS han dejado de ser eficaces contra determinadas cepas bacterianas. Ofrecemos algunos ejemplos recogidos en distintos hospitales a finales de los años noventa. Una cepa de *Staphylococcus aureus* encontrada en Corea es resistente hasta el 98 por ciento frente a la penicilina (*arriba a la izquierda*); otra, hallada en los Estados Unidos, es resistente hasta el 32 por ciento contra la meticilina (*abajo a la izquierda*). De momento, ninguna cepa de éstas es resistente a la vancomicina.





2. LOS COMPUESTOS se mezclan en la campana de gases. A la izquierda aparecen las moléculas orgánicas en fase de purificación. En las dos instalaciones que siguen a la derecha, continúan las reacciones en presencia de gas argón, que se encuentra en los balones y que protege, a las moléculas sensibles, del oxígeno y del agua que hay en el aire.



elevadas, lo que permite un agarre más firme y, en consecuencia, un poder mayor contra el peptidoglicano. Este análogo es eficaz contra los VRE y se halla en fase de ensayo clínico.

Otros antibióticos glicopeptídicos emplean una estrategia diferente. Se trata de la dimerización, proceso en cuya virtud dos moléculas se unen entre sí para formar un complejo unitario. Al crear parejas, o dímeros de vancomicina, podemos reforzar la fuerza del fármaco. Una molécula de vancomicina se une al peptidoglicano y arrastra la aproximación de la otra mitad del par, la otra molécula de vancomicina. Aumenta así la eficacia del fármaco con su presencia mayor. En nuestro laboratorio nos proponemos facilitar el emparejamiento de la vancomicina; hemos logrado ya varias moléculas de vancomicina diméricas con una actividad excepcional frente a VRE.

Pese a todo, podríamos fracasar. Se acaba de descubrir un segundo mecanismo en virtud del cual la VRE engaña a la vancomicina. En vez de sustituir un átomo en la D-alanina terminal, la bacteria agrega un aminoácido mayor que la D-alanina en el extremo de la cadena peptídica; de ese modo, el aminoácido evita que la vancomicina llegue a su destino.

Comenzamos a desentrañar también el método que sigue el letal *S. aureus* para adquirir resistencia. La bacteria apelmaza la capa de peptidoglicano y relaja, a la vez, la unión entre los segmentos peptídicos. No importa, pues, que la vancomicina se engarce en la D-alanina; el espesor ha sustituido a la interconexión como fundamento de la fuerza del peptidoglicano. La inserción de la vancomicina carece de eficacia.

El filo de la navaja

Nos enseña la historia de la vancomicina que bastan alteraciones moleculares muy pequeñas para engendrar profundas diferencias. Y las bacterias encuentran múltiples estrategias para engañar a los fármacos, lo que obliga a la búsqueda de medicamentos, nuevos o regenerados. Tradicionalmente, el proceso de identificación de candidatos consistía en un muestreo con células íntegras: las moléculas de interés se aplicaban a células bacterianas vivas. Se trata de un método de probada utilidad, corroborado con el descubrimiento de muchos fármacos, la vancomicina incluida. Suma a su sencillez el rastreo de toda diana posible del fármaco en la célula. Pero la criba de numerosas dianas presenta también inconvenientes. El hombre y las bacterias comparten diversas dianas; los compuestos que actúan contra éstas resultan tóxicos para las personas. Con tal barrido no se saca ninguna información acerca del mecanismo de acción: se sabe que un agente actuó, pero no cómo. Sin ese conocimiento imprescindible, es casi imposible que un nuevo fármaco llegue al dispensario.

Los ensayos que se realizan en dominios moleculares ofrecen una alternativa poderosa. A través de ese muestreo se identifican sólo los compuestos que tienen una mecanismo de acción especificado. Pensemos, por ejemplo, en la búsqueda específica de inhibidores de la transpeptidasa. Pese a la dificultad que entraña el diseño de tales ensayos, descubre fármacos potenciales con modos de acción conocidos. El problema es que sólo se investiga una enzima cada vez. Se daría un gran paso si pudiéramos perseguir simultáneamente más de un objetivo (como ocurre en el proceso en que participan células íntegras) sin merma del conocimiento implícito del mecanismo de operación del fármaco. El gran paso se ha dado. Se ha reconstruido en el tubo de ensayo la vía multienzimática de una bacteria. Con este sistema se pueden identificar moléculas que degradan profundamente una de las enzimas o alteran de un modo sutil varias de ellas.

Con la automatización y la miniaturización se ha multiplicado la celeridad en el cribado de compuestos. La robótica permite estudiar los compuestos a millares. Al mismo tiempo, la miniaturización ha reducido el costo del proceso utilizando cantidades mínimas de reactivos. Con sistemas de cribado ultrarrápidos, podemos investigar cientos de miles de compuestos en un día. Merced a los nuevos métodos de la química combinatoria podemos diseñar cantidades inmensas de compuestos [*véase* “Química combinatoria y nuevos fármacos” por Matthew J. Plunkett y Jonathan A. Ellman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1997]. En el futuro, algunas de estas moléculas nuevas procederán de las mismas moléculas. Una vez que comprendamos la vía por la que estos organismos producen antibióticos, la ingeniería genética facilitará la síntesis de nuevas moléculas relacionadas con ellos.

La ventaja de la genómica

El diseño de fármacos y su muestreo se han beneficiado enormemente del desarrollo reciente de la genómica. Con el conocimiento de los genes y de la síntesis de las proteínas por ellos cifradas, la ciencia se ha adentrado en las propias entrañas moleculares del organismo. A la manera de un servicio de contraespionaje microbiano, importa ahora atentar con-

tra genes de importancia capital, bloquear la síntesis de una proteína específica o alterar la capacidad de un organismo para infectar o desarrollar resistencia.

Muchos de los objetivos contra los que van dirigidos los antibióticos son genes esenciales, genes que provocan la muerte celular si dejan de funcionar. Apenas si cuesta la pronta identificación de dichos genes. Pensemos en un análisis sistemático de los 6000 genes de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Podemos alterar experimentalmente cada uno de estos genes y determinar el efecto en la levadura.

Las proteínas codificadas por los genes esenciales no son los únicos objetivos moleculares en la búsqueda de antibióticos. Importan también los genes que codifican factores de virulencia; eluden éstos la respuesta inmunitaria del huésped y de ese modo preparan el terreno para la colonización de la bacteria. Resultaba antaño harto difícil identificar tales genes porque se "activan" o transcriben por sucesos en el tejido del huésped cuya reproducción *in vitro* se hacía muy compleja. Mas con la técnica actual de expresión *in vivo* (IVET) se puede insertar una secuencia singular de ADN, una forma de etiqueta que desactiva un gen, en cada gen bacteriano. Se aplican bacterias etiquetadas para infectar un organismo, se recuperan luego y se identifican las etiquetas. La desaparición de cualquier etiqueta significa que los genes a los que estaban unidas eran esenciales para la supervivencia de la bacteria, tan esenciales que la bacteria no podría sin ellos vivir en el huésped.

Desde hace tiempo se esperaba que la identificación e inhibición de los factores de virulencia permitieran al sistema inmunitario del organismo combatir las bacterias patogénicas antes de su instalación. Algo se ha avanzado. En un estudio reciente, una molécula experimental que inhibe el factor de virulencia de *S. aureus* ha servido para que los ratones de prueba resistieran la infección.

Además de investigar los genes esenciales y los factores de virulencia, los laboratorios empiezan a descubrir qué genes confieren resistencia a los antibióticos. La polarización en ellos del ataque nos ayudará a rejuvenecer antibióticos desechados por ineficaces. En esa línea laboran los antibióticos β-lactámicos como la penicilina. El mecanismo habitual de resistencia contra los antibióticos β-lactámicos estriba en la producción bacteriana de β-lactamasa, enzima que corta uno de los enlaces del antibiótico, cambiando su estructura y evitando la inhibición de la transpeptidasa. Si se silencia la β-lactamasa, el antibiótico permanece eficaz. Eso es justamente lo que hace el ácido clavulánico, un inhibidor de la β-lactamasa: se mezcla con la amoxicilina para crear el antibiótico Augmentine.

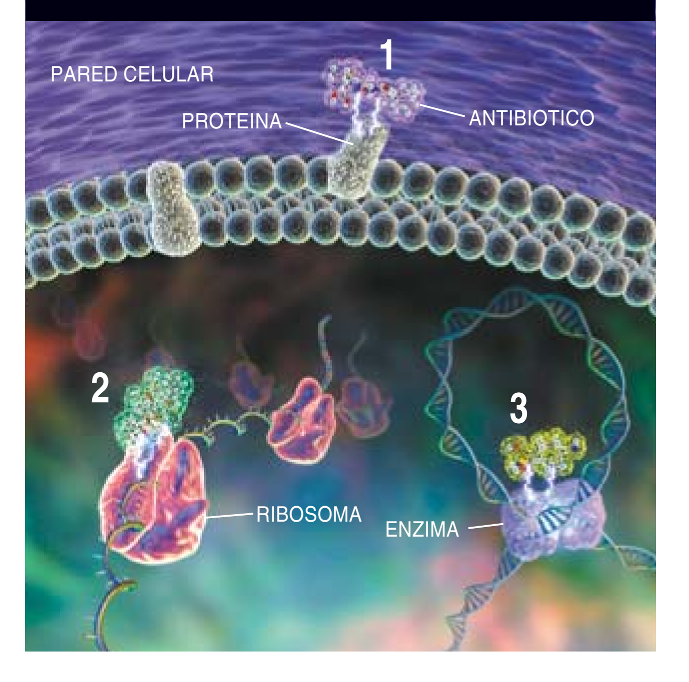
Cuando en un futuro próximo dominemos mejor la transcripción del ADN, será práctica rutinaria la identificación de determinantes de resistencia, como la β-lactamasa, y factores de virulencia. Habrá llegado entonces el momento de poder identificar los genes que intervienen en diferentes condiciones de desarrollo celular. Mediante la identificación de los genes bacterianos cuya expresión aumenta al infectar un huésped determinaremos los genes de virulencia. Estableceremos los genes de resistencia a los antibióticos mediante la comparación entre niveles de expresión en bacterias tratadas con antibióticos y los manifestados en bacterias sin tratar. Aunque en su infancia, esta técnica ha detectado cambios minúsculos en el número de episodios de transcripción. Con el dominio del perfil de transcripción del ADN, podrá establecerse si determinados fármacos aplican mecanismos de acción totalmente nuevos o tienen dianas celulares inéditas que podrían señalar caminos a la investigación antibiótica no transitados.

Sacrificio del mensajero

En otra línea interesante de la investigación genómica se busca la inoperancia del ARN bacteriano. En su mayor proporción, el ARN es ribosómico (ARNr), componente estructural principal de

Mecanismo de acción de los antibióticos

LOS ANTIBIOTICOS combaten las infecciones impidiendo que la bacteria sintetice sustancias esenciales. La vancomicina y los antibióticos β-lactámicos obstaculizan la síntesis de la pared celular (*1*). La eritromicina y la tetraciclina alteran los ribosomas donde se sintetizan las proteínas (*2*). Los antibióticos quinolónicos inhiben enzimas que participan en la replicación del ADN (*3*), y los antibióticos de sulfonamida obstaculizan también la síntesis de ADN (*no representados*).





los ribosomas. Son éstos fábricas de ensamblaje de las proteínas. La vulnerabilidad del ARN ribosómico yace en la diversidad de lugares donde pueden anclarse los fármacos. Carece, además, de capacidad para autorrepararse. En 1987 se comprobó que los antibióticos aminoglicósidos —la estreptomicina, entre ellos— se unían al ARNr, lo que comportaba que el ribosoma errase en la lectura del código atinente al ensamblaje de la proteína. Muchos de estos antibióticos, sin embargo, amén de ser tóxicos, presentan una utilidad limitada. En el Instituto Scripps de Investigaciones de La Jolla se acaba de observar un nuevo dímero de aminoglicósido sintético que muestra menor toxicidad.

Podemos entorpecer la acción del ARN mensajero (ARNm), que dirige la síntesis de proteínas y cursa entre el código genético y el ribosoma. El ARN mensajero se crea mediante la lectura de una de las hebras del ADN, aplicando las mismas interacciones entre ácidos nucleicos, o pares de bases, que mantienen unida la doble hélice. La molécula de ARNm porta entonces el mensaje al ribosoma, donde se sintetiza una proteína a través del proceso de traducción. Puesto que cada ARNm codifica una proteína específica y difiere de otros ARNm, contamos con la posibilidad de forjar otras interacciones entre pequeñas moléculas orgánicas —esto es, no proteínas— y ARNm específicos. Es ni más ni menos lo que se les ha ocurrido a químicos de Parke-Davis para combatir la infección de VIH. Tras identificar moléculas que se unen a una parte de una secuencia de ARNm, evitan que ésta interaccione con una proteína activadora necesaria, inhibiendo así la replicación del VIH. Semejante logro experimental debería incitar nuevos estudios sobre el ARNm en la búsqueda de fármacos.

Se trabaja con similar empeño en el dominio de la terapia antisentido. Al generar secuencias de nucleótidos con una secuencia específica de ARNm, encorsetan dicho ácido nucleico. Así aherrojado, el ARNm no puede liberarse del fármaco; o se destruye o queda inactivo. Aunque la FDA ha aprobado ya el primer fármaco antisentido para infecciones del citomegalovirus en el hombre, este tipo de medicamentos no han tenido éxito en las infecciones bacterianas, por diversas razones, entre ellas la toxicidad y la dificultad de que el fármaco alcance una concentración adecuada en el sitio de la infección. Pese a todo, se trata de un campo esperanzador.

De lo que no cabe duda es de que todos estos planteamientos genómicos facilitan la identificación y evaluación de una gama de objetivos biológicos contra los que pueden dirigirse moléculas eficaces. Quedan descartados, por nocivos, numerosos antibióticos desarrollados en el siglo XX. Pero al comparar la secuencia génica del objetivo potencial con los genes que se encuentran en el hombre, podemos identificar genes exclusivos de las bacterias; una vez acotados, podemos concentrar la atención sobre ellos. Igualmente, al comparar la secuencia génica de un objetivo con las de otras bacterias, podemos evaluar la selectividad de un fármaco. Una secuencia objetivo que aparece en todas las bacterias habría de generar, con probabilidad, un antibiótico activo contra muchas bacterias diferentes; vale decir, un antibiótico de amplio espectro. Por el contrario, una secuencia objetivo que aparece sólo en el genoma de algunas bacterias generaría un antibiótico de margen estrecho.

Si los médicos descubren en una fase temprana la cepa bacteriana causante de la infección, pueden afinar y recetar un antibiótico de espectro limitado. Puesto que el medicamento afectará sólo a un subgrupo de la población bacteriana, la presión de selección para desarrollar resistencia será escasa. Los avances en replicación rápida del ADN y en la obtención de perfiles de transcripción podrán hacer que pronto la identificación de cepas bacterianas constituya un protocolo rutinario.

Aunque el cuadro parezca ahora más nítido que años atrás, conviene no perder de vista que, en biología, la carrera armamentística no es cosa nueva. A cada contraataque del hombre le seguirá una respuesta de la bacteria, del tipo que sea; a veces le basta con cambiar un átomo de un aminoácido.

Bibliografía complementaria

THE COMING PLAGUE: NEWLY EMERGING DISEASES IN A WORLD OUT OF BALANCE. Laurie Garrett. Penguin USA, 1995.

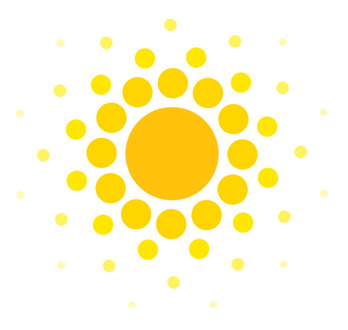
THE CHEMISTRY, BIOLOGY, AND MEDICINE OF THE GLYCOPEPTIDE ANTIBIOTICS. K. C. Nicolaou, Christopher N. C. Boddy, Stefan Bräse y Nicolas Winssinger en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 38, n.º 15, págs. 2096-2152; 2 de agosto de 1999.

GENOME PROSPECTING. Barbara R. Jasny y Pamela J. Hines en *Science*, vol. 286, págs 443-491; 15 de octubre de 1999.

La edad de las estrellas

Se deshizo la paradoja. Las estrellas más viejas conocidas no son mayores que el universo

Brian C. Chaboyer



Hace unos años la cosmología se enfrentaba a lo que dio en llamarse "crisis de edad". Las observaciones de la velocidad de expansión del cosmos otorgaban al universo una edad de 14.000 millones de años, si no más joven. Pero los datos recabados de las estrellas más viejas señalaban que las había con 15.000 millones de años, o más. Ante semejante contradicción no faltaron ni estudios sesudos ni chanzas que hablaban de hijos mayores que sus padres. La cuestión se ha esfumado. Nadie habla ya de crisis de edad. ¿Qué ha ocurrido?

La ciencia cuenta con una historia muy rica en este tipo de paradojas. A menudo han servido para dar un salto imponente en el campo del conocimiento. El debate sobre la antigüedad de la Tierra resultó decisivo para la formulación de la teoría de la selección natural de Charles Darwin. Las discrepancias sobre la edad del Sol no se resolvieron hasta el descubrimiento de las reacciones nucleares. La convicción de Albert Einstein de un universo eterno y estático terminó con las observaciones de la recesión de las galaxias, de Edwin Hubble.

En la reciente crisis de edad hemos de ver también el primer fogonazo de una revolución, a saber, la del reconocimiento de que el universo no está dominado por materia común, ni siquiera por materia oscura, sino por un tipo de energía oscura de la que los cosmólogos apenas han averiguado nada. La aceleración cósmica impuesta por la energía oscura aumenta la edad del universo. Pero ésta no es toda la historia.



1. CUMULO ESTELAR allende nuestra galaxia. Se trata de M80. Debe su aspecto rojizo a la cantidad ingente de estrellas que se hallan en las postrimerías de sus vidas. Hasta hace poco, la edad inferida para este cúmulo entraba en contradicción con la edad asignada al universo, lo que motivó que los astrónomos pensaran que las teorías cosmológicas podrían andar muy erradas.



Volvamos atrás. Cuando la crisis de edad se hallaba en plena efervescencia, los astrónomos responsabilizaban en su mayoría a los cosmólogos. O bien la medición de la velocidad de expansión era incorrecta (decían los teóricos) o bien el modelo cosmológico era falso (clamaban los observadores). Sólo una minoría cuestionaba la edad de las estrellas. Sobre la velocidad de expansión del universo se ha venido disputando, a veces de forma agresiva, durante más de medio siglo, pero solían orillarse muchos de los puntos principales. Por el contrario, la edad estimada de las estrellas en 15.000 millones de años, según propusieron Pierre Demarque, de la Universidad de Yale, y otros investigadores, parecía muy bien asentada. Desde mediados de los años sesenta hasta mediados de los noventa del siglo XX, los modelos teóricos predecían tal antigüedad, si no mayor, para las estrellas más viejas. Los astrónomos se mostraron siempre muy seguros de sus mediciones.

Seguridad que carecía, en este caso, de fundamento. Basándose en los resultados del satélite *Hipparcos* y en nuevos cálculos sobre la evolución de las estrellas, los astrónomos han llegado a la conclusión de que las estrellas más ancianas tienen apenas 13.000 millones de años. Terminó así la crisis de edad.

Devoradores de gas

Imaginemos que se avería el odómetro de nuestro coche. ¿Cómo determinar la distancia recorrida? Si se conoce la capacidad del depósito de combustible y el consumo por kilómetro, el cálculo es sencillo; basta con dividir la cantidad de combustible por el consumo. La misma regla se aplica a las estrellas. El tamaño del depósito es aquí la masa de la estrella; el consumo, la tasa de combustión nuclear.

Durante la mayor parte de su historia, las estrellas viven de la fusión de hidrógeno. El intenso calor del interior estelar promueve la combinación de cuatro átomos de hidrógeno (cada uno con un protón) en un núcleo de helio (dos protones y dos neutrones). Cuatro protones juntos pesan un 0,7 % más que un núcleo de helio; este exceso se libera en forma de energía, según la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$. El Sol, por ejemplo, emite 4×10^{26} watt de luz, lo que significa que tiene que estar transformando 600 millones de toneladas de hidrógeno en 596 millones de toneladas de helio por segundo.

En 1000 millones de años el Sol quema un 1 % de su masa total. Puesto que sólo un 10 % de la masa solar sirve de combustible —a saber, la proporción que alcanza las temperaturas y densidades necesarias para la fusión del hidrógeno—, el astro puede durar unos 10.000 millones de años. Durante ese intervalo o fase de secuencia principal, el Sol se mantendrá a temperatura y luminosidad más o menos constantes.

Las estrellas más pesadas que el Sol queman su hidrógeno a una velocidad mucho mayor; tan célere, que, aunque comienzan con más cantidad de combustible, lo consumen antes. Esta tendencia se deduce de las leyes físicas que gobiernan la estructura de una estrella: la ley del equilibrio hidrostático (en cuya virtud la fuerza de gravedad se ve compensada con la presión del gas), la ley de los gases ideales (que relaciona presión, densidad y temperatura) y la ley del transporte radiativo del calor (que determina cómo debe ser el gradiente de temperaturas para asegurar que se libere de la estrella una cantidad suficiente de energía). Converge todo ello en un resultado neto: que la luminosidad estelar varíe aproximadamente con la cuarta potencia de la masa. La cantidad de combustible, por el contrario, guarda sólo proporción con la masa. Por tanto, el tiempo que una estrella pasará en la secuencia principal será más o menos proporcional al inverso de la masa al cubo. Una estrella cuya masa decuplique la del Sol brillará 10.000 veces más, pero durará unas 1000 veces menos; esto es, unos 10 millones de años.

Cuando una estrella agota el hidrógeno de su interior, comienza a expulsar gas hacia el exterior. Aumenta de tamaño y entra en la fase de gigante roja, que se distingue por una mayor luminosidad, aunque menor temperatura superficial. Se convierte en una estrella caliente y roja. Con rapidez, la estrella busca formas de generar energía y termina por consumir todas sus reservas de gas. Podemos apreciar tal evolución al representar el brillo visual (relacionado con

Panorámica / *Estrellas antiquísimas*

Con el sentido común no se va muy lejos en cosmología. En este caso, sin embargo, su fuerza es irrebatible: el universo debe ser más viejo que las estrellas más ancianas. Pero las observaciones parecían indicar lo contrario. Los astrónomos atribuyeron la contradicción a las teorías cosmológicas. El error resultó esconderse en la astrofísica estelar.

Muchas de las estrellas más viejas residen en los cúmulos globulares. Todas las estrellas componentes de tales enjambres nacieron por la misma época.

Las estrellas de mayor tamaño y más brillantes viven muy deprisa y mueren jóvenes. Cuanto mayores sean, antes desaparecen. Por lo que si se investiga un cúmulo y se observa qué estrellas se han desvanecido ya, se puede calcular la edad del cúmulo entero.

El satélite *Hipparcos* dio con la solución: descubrió que los cúmulos globulares distaban mucho más de lo que se suponía en un principio. Por tanto, sus estrellas son intrínsecamente más brillantes y jóvenes. Su edad, alrededor de 13.000 millones de años, concuerda con la edad del universo, unos 14.000 millones de años.

2. EN LA NEBULOSA NGC 3603 encontramos estrellas en diversas fases de su vida, desde la gestación hasta la madurez: nubes incubadoras en forma de glóbulos de Bok (*1*), pilares de gas denso (*2*), protoestrellas con discos protoplanetarios (*3*), un cúmulo de estrellas jóvenes y calientes (*4*), una estrella gigante en vías de extinción expulsando anillos de gas (*5*) y nubes (*6*).

el flujo emergente total) y el color (relacionado con la temperatura superficial) en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Por las leyes de escala examinadas antes, las estrellas de la fase de secuencia principal caen sobre una línea diagonal. Cuando la estrella se convierte en gigante roja, abandona la secuencia principal y pasa a ocupar una línea prácticamente horizontal (*véase la figura 5*).

Aunque los astrónomos pueden deducir el tiempo total de vida de una estrella, resulta harto difícil averiguar cuántos años ha vivido tal o cual estrella. Las que se hallan en la secuencia principal son un ejemplo excelente de estabilidad; sin embargo, no podemos precisar su edad. Sólo cuando una estrella entra en el declive de su vida, cambia radicalmente y, de esa forma, facilita su edad. Por ese motivo los



El autor

BRIAN C. CHABOYER, profesor en el departamento de física y astronomía en el Colegio Dartmouth, lidera la investigación asociada a la Misión Espacial de Interferometría de la NASA. Doctor por la Universidad de Yale, trabajó con Pierre Demarque, uno de los primeros estudiosos de la evolución de las estrellas deficientes en metales.

astrónomos determinan las edades estelares analizando poblaciones enteras de estrellas que nacieron en torno a la misma época. Dan por supuesto que ese grupo de estrellas es tan viejo como las estrellas más viejas del conjunto: las que abandonaron la secuencia principal y se han instalado ahora en la fase de gigantes rojas.

Datación en cúmulos

Los cúmulos globulares forman una clase particular de asociaciones estelares. Según parece, contienen algunas de las estrellas más antiguas de nuestra galaxia. Los cúmulos, compactos y densos, almacenan desde 100.000 hasta millones de estrellas en una bola de apenas 100 años luz de diámetro. Si contempláramos el cielo nocturno apostados en un planeta imaginario del interior de un cúmulo globular divisaríamos una panorámica espectacular, con más de 100.000 estrellas ante nuestra vista. Por mor de comparación, sólo unas 6000 estrellas son perceptibles por el ojo humano en la Tierra [*véase* "Cúmulos globulares", por Ivan R. King; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1985].

El Sol y el 75 % de las estrellas de la Vía Láctea residen en un disco plano. En cambio, los cúmulos globulares se encuentran en un halo esférico que rodea al disco. Otras galaxias grandes alojan también este tipo de cúmulos, que se distribuyen de una forma muy similar. Para datar la edad de los cúmulos, su ubicación importa mucho. En los años treinta, Walter Baade demostró que las estrellas de nuestra galaxia se repartían en dos grandes categorías. Las estrellas brillantes y azules —cuya masa ingente denuncia su juventud— se alojan en el disco. Las estrellas del halo tienden a ser más débiles y rojas. Baade, que desconocía la razón de esa diferencia, se limitó a ponerles nombre: llamó Población I a las estrellas brillantes y azules; Población II, a las estrellas débiles y rojas. Hoy conocemos el motivo de la disparidad. El disco contiene grandes cantidades de nubes de gas, lo que se traduce en formación y nacimiento de nuevas estrellas jóvenes. El halo de la galaxia carece de gas, por lo que muy pocas estrellas pueden engendrarse ahí; el halo es el hogar de las estrellas más ancianas.

De hecho, los cúmulos globulares podrían ser los residuos del proceso de formación de nuestra galaxia. Sus estrellas apenas presentan pequeñas cantidades de elementos más pesados que el helio.



3. EL ENORME CUMULO GLOBULAR G1 se encuentra allende la galaxia de Andrómeda. Cerca del centro de nuestra galaxia (*página contigua*) se distingue un cúmulo distinto y más joven de estrellas, el cúmulo Quíntuple. En ambos casos, todas las estrellas nacieron simultáneamente.



Llamados metales por los astrónomos (para escándalo de los químicos), estos elementos constituyen aproximadamente el 2 % de la masa solar, pero sólo entre el 0,01 % y el 0,5 % de la masa de una estrella globular. A excepción del litio, tales elementos se originan exclusivamente en las estrellas; su escasez indica que los cúmulos globulares se crearon muy temprano, al poco de la gran explosión, aprovechando material que no dispuso de tiempo suficiente para haber sido contaminado por generaciones sucesivas de estrellas.

En el interior de un cúmulo globular, las estrellas que han agotado ya el hidrógeno de su núcleo alcanzan brillo y temperatura similares; dicho de otro modo, parejas masa y edad. En el diagrama de Hertzsprung-Russell tal coincidencia provoca un corte abrupto en la distribución de las estrellas de la secuencia principal. Abundan las estrellas de menor masa, con vidas muy largas, en tanto que las estrellas más pesadas se han convertido en gigantes rojas. Este corte brusco confirma que las estrellas del cúmulo nacieron por el mismo tiempo.

Composición de una estrella

Conocida esa gavilla de propiedades, debiera ser un ejercicio directo el inferir la antigüedad de un cúmulo. Los astrónomos construyen el diagrama de Hertzsprung-Russell con una muestra amplia de estrellas del cúmulo. La figura resultante nos revela cuáles han agotado su combustible principal. La luminosidad y temperatura de esas estrellas se traducen en una cierta masa y una cierta edad según los modelos teóricos. Pero esa tarea encierra su complicación, debido a tres factores: sensibilidad a la composición química de las estrellas, detalles de los modelos estelares y las incertidumbres que rodean a la conversión del brillo observado en luminosidad intrínseca.

Aunque los metales constituyen una mínima parte de una estrella, ejercen una influencia desmesurada en la estructura estelar. Estos elementos contribuyen a la gravedad estelar, pero no están sometidos a la fusión. Frenan el motor nuclear al aumentar la temperatura en el interior de la estrella. Es más, los metales absorben la luz, con lo que dificultan que la energía abandone la estrella hacia el espacio exterior. La absorción provoca que la estrella se expanda ligeramente; y ahora la misma energía emergente se distribuye sobre un área superficial mayor, con la caída subsiguiente de la temperatura de superficie. Estos dos efectos, juntos, determinan que una estrella pobre en metales aparezca más brillante y caliente que otra estrella rica en metales e igual masa. Si los astrónomos sobreestiman el contenido metálico estelar, obtienen valores pequeños de la masa y la edad.

Para determinar la composición de una estrella, se analiza su espectro, las líneas oscuras de longitudes de onda características, de acuerdo con la presencia de elementos diferentes en las capas externas de la estrella. En los últimos 20 años, con el advenimiento de grandes telescopios y mejores detectores electrónicos, se han obtenido espectros de mayor resolución y excelentes relaciones señal-ruido. Los errores en las mediciones han caído en un factor superior a tres. Utilizando los telescopios Keck, los equipos de Judith G. Cohen, del Instituto de Tecnología de California, y Raffaele G. Gratton, del Observatorio Astronómico de Padua, han obtenido con una precisión sin precedentes la concentración de metales en los cúmulos globulares NGC 6528 y NGC 6553.

Los modelos teóricos, y entramos en la segunda complicación, constituyen sólo una aproximación de los sucesos reales del interior de una estrella. Durante varios años, las investigaciones solares han puesto de manifiesto estas limitaciones. Las ondas sonoras del astro, por ejemplo, nos revelan que el helio se va decantando poco a poco hacia el centro del Sol, tal y como Jørgen Christensen-Dalsgaard, de la Universidad danesa de Århus, David B. Guenther, de la Universidad de Santa María en Nueva Escocia, y otros han demostrado. El helio reemplaza al hidrógeno; por mor de esa sustitución, merma la cantidad de combustible y, por tanto, se acorta la esperanza de vida solar. Con mis colaboradores he depurado la modelización de la convección y mejorado la descripción de la respuesta del gas ante los cambios de presión y temperatura. De acuerdo con ello, la edad de los cúmulos globulares se reduce en un 14 %. Los modelos estelares explican ya el Sol con bastante rigor.

La época de la incertidumbre

La tercera ambigüedad, la más profunda también, en que se halla envuelta la determinación de la edad de una estrella concierne a su luminosidad. El brillo observado de una estrella depende de su lejanía y de su luminosidad intrínseca. La de medir distancias es una de las tareas más correosas de la astronomía. Todas las estrellas parecen caer sobre una superficie del firmamento, sin ofrecernos sensación alguna de profundidad. Para añadir la tercera dimensión, los astrónomos deben fiar en varias técnicas, cada una de las cuales se aplica a objetos situados en cierto intervalo de distancias.



4. LAS NUEVAS ESTRELLAS de la nube molecular gigante en Orión A encienden el polvo, expulsan chorros de materia y desencadenan ondas de choque.

El primer peldaño de la escalera de las distancias corresponde a la paralaje, o desplazamiento aparente de la posición cuando se mueve el punto de observación. Para mostrar la naturaleza de la paralaje se acostumbra pedirle al alumno que extienda el brazo y levante un dedo, alternativamente cierre el ojo derecho y después el izquierdo. El dedo parece que salta hacia un lado y hacia el otro con respecto al fondo, simplemente porque cada ojo mira al dedo desde distinto flanco de la nariz. Si se acerca el dedo hacia la cara, se observa que la paralaje aumenta. Los objetos más cercanos tienen una paralaje mayor que los lejanos.

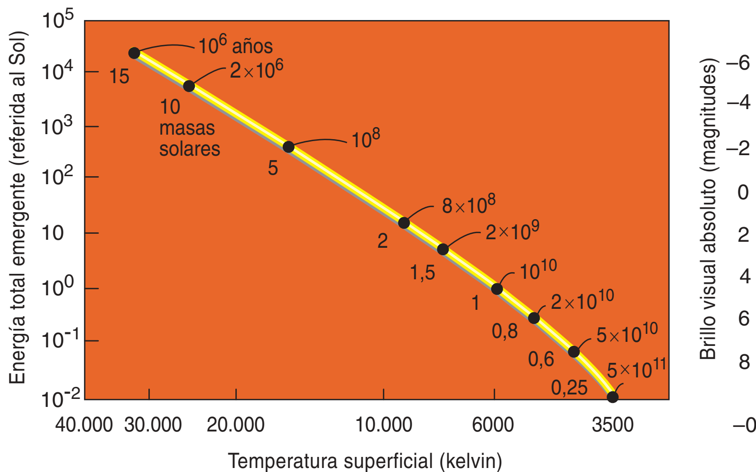
Los astrónomos miden la paralaje de las estrellas siguiendo su posición en el transcurso de un año. Desde distintos lugares de la órbita terrestre, las estrellas cercanas parecen avanzar y retroceder con respecto a las estrellas lejanas. Los astrónomos miden esta paralaje estelar cual ángulo que, combinado con el diámetro de la órbita de la Tierra (a su vez determinado por la paralaje de cuerpos del sistema solar), proporciona una distancia. La estrella que se mueva un segundo de arco en tres meses se hallará, por definición, a un parsec (3,26 años luz). Por trigonometría elemental, la paralaje es inversamente proporcional a la distancia. Los telescopios instalados en el suelo distinguen paralajes de 0,01 segundos de arco; pueden, pues, facilitar distancias con una precisión del 10 % hasta unos 10 parsecs.

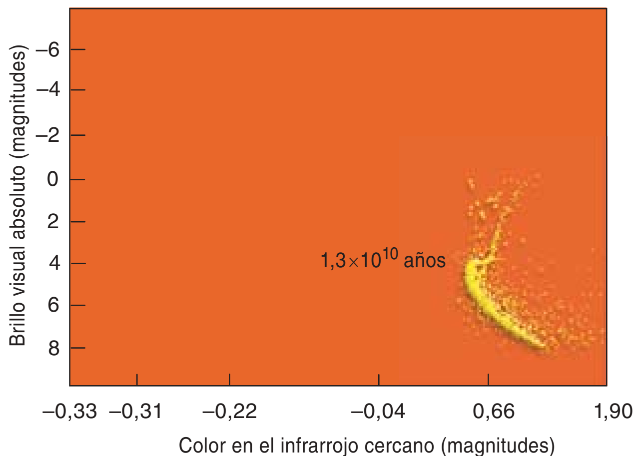
A escalas galácticas, una distancia de 10 parsecs resulta irrisoria. Es más, los errores crecen sistemáticamente con la distancia: los telescopios que operan al límite de su resolución tienden a sobreestimar las paralajes pequeñas y, por tanto, a proporcionar distancias menores. Para definir las distancias cósmicas la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en órbita el satélite *Hipparcos* en una misión de 4 años; la sonda llegó donde ningún otro telescopio de tierra había arribado. Con una precisión de 0,001 segundos de arco, se observaron estrellas a distancias 10 veces mayores. Aunque es una lejanía insuficiente todavía para alcanzar los cúmulos globulares más próximos, *Hipparcos* analizó la distancia hasta algunas estrellas deficientes en metales que se parecen a las de los cúmulos. Dando por buena la idea de que estas estrellas tienen la misma luminosidad intrínseca que la de los cúmulos globulares y el mismo color, los astrónomos han medido la distancia a los cúmulos con una precisión nunca alcanzada.

Menos viejo de lo que parece

El resultado ha sido sorprendente. Los cúmulos globulares distan un 10 % más de lo que se creía. En consecuencia, son intrínsecamente más luminosos, más jóvenes. Aunque no cabe dudar de las nuevas mediciones de la edad, la escala de distancias podría ser imprecisa, y los modelos estelares podrían resultar todavía incompletos.

Los astrónomos han buscado otras vías para corroborar las mediciones de distancias. Por ejemplo, el examen de los movimientos de nu-





5. EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL muestra que la energía emergente y la temperatura de las estrellas de mediana edad siguen la "secuencia principal". Cuando una estrella comienza a extinguirse, cambia de dirección (*izquierda*). Basándose en el brillo observado y en los colores de las estrellas del cúmulo NGC 6652 (*derecha*), los astrónomos han construido este diagrama y han seleccionado las estrellas que han iniciado el camino de su muerte. (Debido a la diferente composición química, las líneas de la secuencia principal están ligeramente desplazadas.)

merosas estrellas del cúmulo globular. El movimiento de una estrella consta de dos componentes: la velocidad radial (a lo largo de la línea de visión) y la velocidad angular (a través del cielo). Cada componente debe determinarse por separado: la velocidad radial a través del efecto Doppler, la velocidad angular a través de fotografías tomadas con los años. Puesto que la velocidad angular aparente es función de la distancia, pero no así la velocidad radial, cualquier ecuación que relacione ambas velocidades proporcionará la distancia. En el caso de una estrella aislada, las dos componentes están completamente separadas, pero en el cúmulo globular, donde miles de estrellas se mueven aleatoriamente, la velocidad radial media debe ser igual a la velocidad angular media. Así se han medido las distancias a que se encuentran los cúmulos globulares.

Este método sugiere que *Hipparcos* ha sobreestimado las distancias. La mejor determinación actual de la edad del cúmulo globular más viejo la cifra en 13.000 millones de años, más o menos 1500 millones de años. Esta revisión de la medida coincide muy bien con la edad estimada del universo a tenor de las observaciones más recientes de la velocidad de expansión. Por primera vez desde que apareciera, cincuenta años atrás, la moderna cosmología, ésta y la astrofísica estelar se han puesto de acuerdo.

A pesar de que la datación de los cúmulos globulares es la vía principal para determinar la edad de la galaxia, existen otras pruebas que aportan valores similares. A comienzos del año en curso, el grupo encabezado por Roger Cayrel, del Observatorio de París, aplicó una técnica tomada en préstamo a arqueólogos y geólogos. Me refiero a la datación por radioisótopos. Midieron la concentración de uranio en una estrella distinta del Sol, una estrella de la antigua Población II. La abundancia de los elementos más pesados en CS 31082-001, de esa estrella se trata, es tan sólo un 12 % de la solar, salvo para el uranio 232 y el uranio 238. Si aceptamos que el torio y el uranio comenzaron también con una concentración del 12 % solar, hubieron de transcurrir unos 12.500 millones de años (más o menos 3000 millones de años) para que estos isótopos radiactivos se desintegraran hasta las cantidades actuales. Con el tiempo, el análisis y estudio de los radioisótopos desplazará a los cúmulos globulares en las técnicas preferidas para la datación.

Mientras tanto, importa confirmar las mediciones realizadas de los cúmulos globulares. Los nuevos telescopios afincados en el suelo, como el Telescopio Muy Grande (VLT) del Observatorio Europeo Austral, prometen profundizar en la composición química de las estrellas de los cúmulos. Los nuevos observatorios espaciales, como el satélite *Gaia* de la ESA y la *Misión Espacial de Interferometría* de la Agencia Nacional para la Aeronáutica y el Espacio norteamericana (NASA), se lanzarán a finales de este decenio. Con una resolución 250 veces superior a la de *Hipparcos*, las nuevas sondas sortearán procesos intermedios y medirán la distancia a los cúmulos globulares directamente, para ofrecer la respuesta que los astrónomos han venido persiguiendo durante mucho tiempo.

Bibliografía complementaria

STARS. James B. Kaler. W. H. Freeman, 1998.

GLOBULAR CLUSTER DISTANCE DETERMINATIONS. Brian Chaboyer en *Post-Hipparcos Cosmic Candles*. Dirigido por André Heck y Filippina Coputo. Kluwer, 1999.

HIPPARCOS: THE STARS IN THREE DIMENSIONS. Michael Perryman en *Sky & Telescope*, vol. 97, n.º 6; junio 1999.

STELLAR STRUCTURE AND EVOLUTION: DEDUCTIONS FROM HIPPARCOS. Yveline Lebreton en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, págs. 35-77; 2000.

ARMAS SUB SUPERC

Viajando dentro de burbujas reductoras de la resistencia al avance, torpedos secretos y otros sistemas navales submarinos pueden moverse a centenares de millas por hora

Steven Ashley

MARINAS
AVITANTES



Cuando, en agosto del año 2000, se hundió el submarino ruso K-141 *Kursk* no tardó en propalarse el rumor de que las misteriosas explosiones que enviaron la nave al fondo del mar de Barents tenían que ver con las pruebas de un torpedo ultrarrápido. Unos meses antes, Edmond Pope, industrial norteamericano, fue detenido en Moscú acusado de espionaje. Se dijo que había intentado comprar los planos de un torpedo ultrarrápido. Aunque los pormenores del trágico accidente naval y del caso de espionaje siguen envueltos en el misterio, todo indica que ambos incidentes se hallaban relacionados con una nueva técnica que permite a las armas navales y a los barcos navegar sumergidos a cientos de millas por hora, en ocasiones más rápidos que la velocidad del sonido en el agua. Recuérdese que las técnicas subacuáticas tradicionales más veloces tienen su límite en 80 mph.

Cada vez resulta más evidente que las principales potencias navales del mundo pugnan por lograr armas y flotas submarinas capaces de operar a velocidades inauditas. Tal posibilidad de viajar a alta velocidad (una especie de "filo guiado" acuático) se basa en el fenómeno físico de la supercavitación. Se produce este efecto de mecánica de fluidos cuando se forman burbujas de vapor de agua al abrigo de cuerpos sumergidos en corrientes de agua rápidas. El ardid consiste en rodear un cuerpo de una envoltura de gas renovable, de suerte que el líquido humedezca sólo una pequeña parte de la superficie del objeto en cuestión; de ese modo se reduce drásticamente el retardo viscoso. Para la guerra naval, los sistemas supercavitantes podrían suponer un salto cualitativo, no menor que el dado desde los aviones de hélices hasta los reactores e incluso hasta cohetes y misiles.

Con la escasez de las inversiones en investigación sobre supercavitación (en EE.UU., unos 50 millones de dólares) contrasta la lista, larga y sobrecogedora, de armas supercavitantes potenciales. Abarca proyectiles submarinos antiminas, torpedos buscadores, embarcaciones (incluso aviones de vuelo rasante y helicópteros) procedentes de barquillas sumergidas que recuerdan a las torretas de los bombarderos de la II Guerra Mundial. Pueden agregarse torpedos antibuques y antitorpedos y "rompe-combates no guiados de alcance medio", que son armas grandes proyectadas para forzar un final en conflictos entre submarinos. Se vislumbran, asimismo, embarcaciones de superficie superrápidas, amén de misiles submarinos con capacidad nuclear concebidos para neutralizar grupos de combate de portaaviones enteros.

Los sistemas supercavitantes podrían alterar la naturaleza de la guerra submarina, cambiando las furtivas luchas de acecho entre submarinos de gran tamaño en algo parecido a combates aéreos, con enfrentamientos supercéleres entre pequeños "subcazas" de corta autonomía que se dispararán proyectiles entre sí, lanzados desde "subportadores" gigantes.

Se apunta también la posibilidad de poner en servicio torpedos/misiles supercavitantes multietapa de largo alcance y dotados de cabezas nucleares ("armas guiadas de respuesta precoz de largo alcance"); constituirían una contramedida bastante barata y eficaz contra futuros sistemas de defensa misilísticos. Tales artefactos podrían proyectarse desde muchas millas mar adentro, emerger en aguas costeras cerca de los objetivos y soltar su carga letal antes de que pudieran reaccionar las defensas aéreas o espaciales.

Nos acabamos casi de enterar de un arma supercavitante que existe desde hace muchos años. En 1977, tras diez años de investigación y desarrollo, la armada soviética introdujo un torpedo de propulsión cohete llamado Shkval (Turbonada) capaz de "volar" por el agua a 100 metros por segundo (unos 200 nudos) o más dentro de una cavidad de gas autogenerada. Aunque ese misil submarino de punta nuclear sea en determinados aspectos un tanto tosco, la noticia de su existencia obligó a las potencias militares occidentales a prestar atención a la técnica supercavitante.

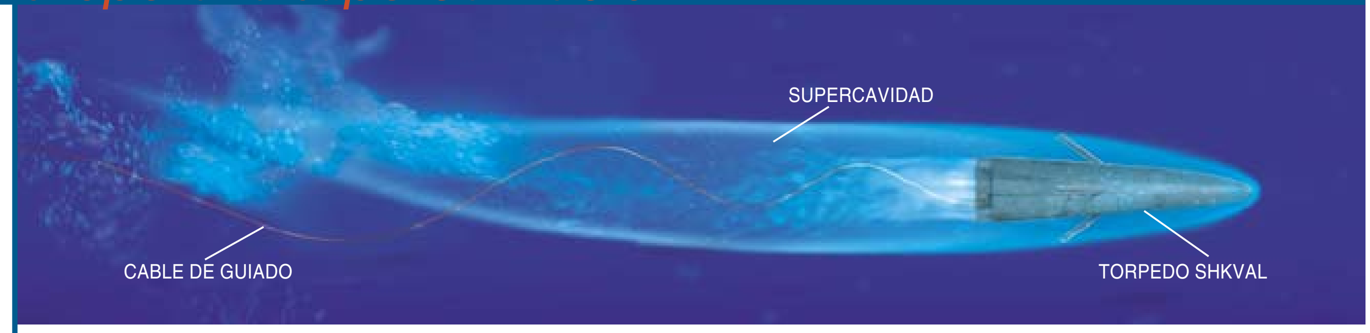
Antes de que cristalicen las técnicas de nueva generación habrá que resolver numerosas dificultades. De navegación, por ejemplo. Aunque probablemente el mayor obstáculo para avanzar sea allegar capital suficiente para desarrollar y construir sistemas marinos supercavitantes.

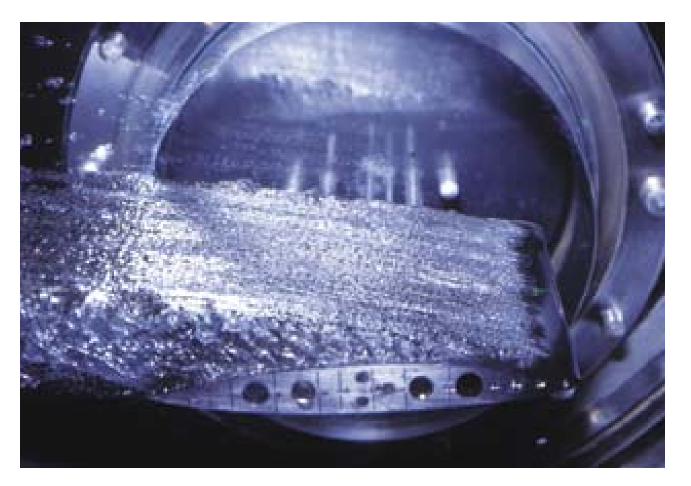
Hay quien cree que, en muchos aspectos, nos encontramos en una situación parecida a la del avión inmediatamente después del primer vuelo de los hermanos Wright. Así opina Robert Kuklinski, de la División Newport (Rhode Island) del Centro Naval de Guerra Submarina (NUWC), primer laboratorio de la armada estadounidense

Armas submarinas rápidas

- Los principales ejércitos están desarrollando arsenales de armas submarinas y buques innovadores, muy veloces, basados en la supercavitación. En virtud de ese fenómeno se reduce la resistencia hidrodinámica y los ingenios se desplazan encerrados en una burbuja de gas y vapor de agua.
- La armada rusa ya ha desplegado un torpedo supercavitante de propulsión cohete —el Shkval (Turbonada)— del que se dice que avanza a 230 nudos. Rusia, para paliar su mala situación económica, proyecta sacar a la venta una versión mejorada.
- La lista de potenciales armas navales supercavitantes comprende proyectiles submarinos de corto alcance para destruir minas y torpedos, torpedos de alta velocidad, grandes misiles submarinos para destruir grupos de combate completos, pequeños buques de superficie ultrarrápidos y, quizá, submarinos supercavitantes. También se ha pensado en un torpedo/misil multietapa de largo alcance con cabezas nucleares.

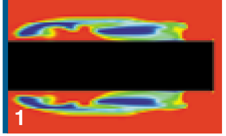
Así opera la supercavitación

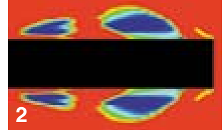




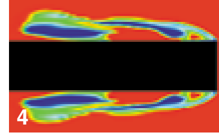
1. **CUANDO EN TORNO a un objeto fluye agua a gran velocidad, la presión en el seno de ésta disminuye. A velocidades superiores a los 50 metros por segundo, la presión baja lo suficiente para que el agua se vaporice y forme una burbuja gaseosa en la parte posterior del objeto (cavitación). Si la burbuja gaseosa rodea por entero al objeto, se produce el fenómeno de la supercavitación. Los cuerpos esbeltos axisimétricos, tales como el torpedo ultrarrápido ruso Shkval (*arriba*), crean unas supercavidades elipsoidales alargadas. La fotografía del centro muestra una aleta sometida a ensayo en el túnel hidrodinámico de la Universidad de Grenoble (Francia). El flujo que discurre a gran velocidad (*procedente de la derecha*) genera supercavitación en la superficie superior. El modelado fluidodinámico por ordenador de ARL/Penn State muestra una cavitación parcial, causada por la corriente sobre un cuerpo de proa roma, y el fenómeno que los especialistas llaman "sangría de la cavidad" (*el líquido es rojo y el vapor es azul*).**

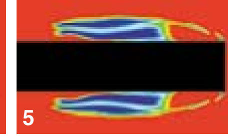
Modelo computerizado de cavitación parcial

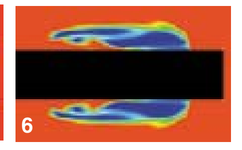












en la investigación de sistemas supercavitantes. Con una salvedad, sin embargo: dominamos bastante mejor la física y la técnica.

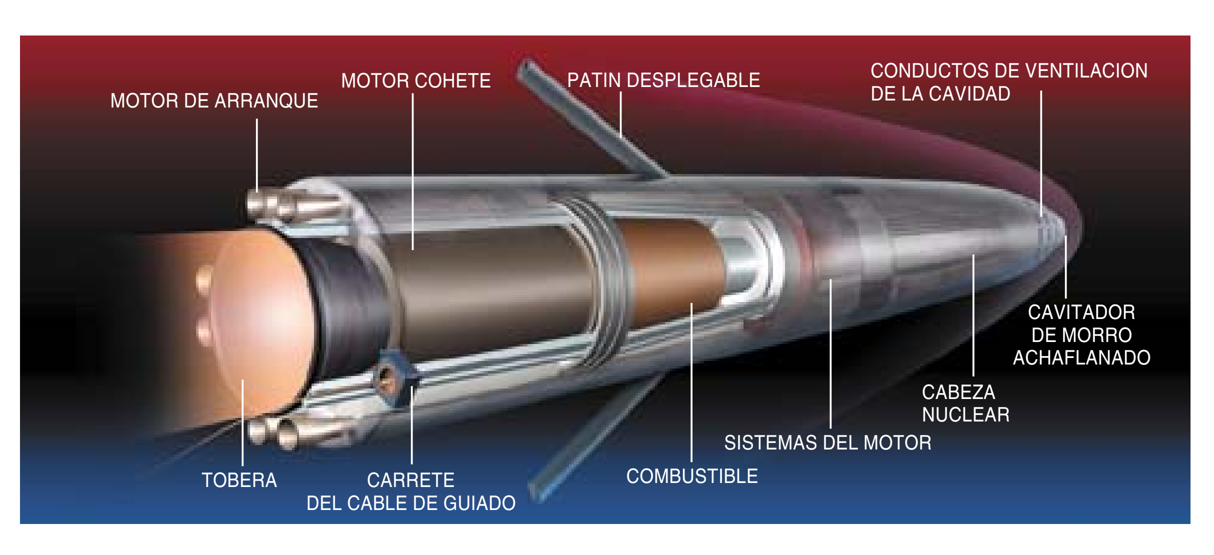
Supercavitación: fundamentos

Impulsar un cuerpo por el agua requiere un esfuerzo considerable. Acelerar la marcha cuesta más, pues el rozamiento superficial aumenta con la velocidad. Y todavía más difícil se hace bracear bajo el agua, pues ésta opone una resistencia al avance mil veces mayor que la del aire.

Los ingenieros navales bregan constantemente con esos problemas seculares cuando conforman los cascos diseñándolos para minimizar la resistencia de rozamiento y dotan a los barcos de motores potentes para impulsarlos contra el oleaje. Ahora, científicos e ingenieros proponen un nuevo procedimiento para vencer el retardo viscoso y moverse por el agua a grandes velocidades. Se trata, a la postre, de minimizar la superficie mojada del cuerpo encerrándolo en una burbuja de gas de baja densidad.

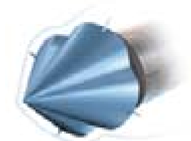
Cuando un fluido se mueve rápidamente alrededor de un cuerpo, la presión en el seno del fluido desciende, especialmente en los bordes de salida de dicho cuerpo. Al aumentar la velocidad, llega un momento en que la presión en la corriente se iguala a la presión de vapor del agua; el fluido sufre un cambio de fase y se transforma en gas, en vapor de agua. En otras palabras, con una presión insuficiente para mantenerlas unidas, las moléculas de agua líquida se disocian y forman un gas.

Bajo ciertas circunstancias, y sobre todo en las aristas vivas, el flujo puede envolver y retener cavidades llenas de vapor de agua y aire a presión aproximadamente constante que van a remolque. A ese fenómeno se le llama cavitación natural. "La cavidad adquiere la forma necesaria para conservar el estado de presión constante en su contorno, forma que depende del cuerpo que la crea, la presión en la cavi-



2. TORPEDO RUSO SHKVAL (*corte*). Dispone de un cavitador de disco plano en la punta que crea una cavidad parcial; ésta se expande hasta convertirse en supercavidad mediante los gases que se le inyectan procedentes de los conductos de descarga montados en la parte delantera. Unos pequeños cohetes de arranque ponen en movimiento al artefacto hasta que se forma la cavidad, instante en que entra en juego el gran cohete central.







3. PARA CREAR SUPERCAVIDADES puede recurrirse a geometrías de morro diversas: discos planos, conos, placas y conos "dentados" (*arriba* y *centro*), concavidades facetadas y cavitadores con conos inscritos que entran y salen como la punta de un bolígrafo (*abajo*).

dad y la fuerza de la gravedad", explica Marshall P. Tulin, director del Laboratorio de Ingeniería Oceánica de la Universidad de California en Santa Bárbara y pionero de la teoría de flujos supercavitantes. Los ingenieros navales tratan de evitar la cavitación porque deforma la corriente de agua, con menoscabo del rendimiento funcional de bombas, turbinas, hidroaletas y hélices. Puede también inducir unas ondas de choque violentas (a causa del colapso rápido de la burbuja), que corroen y erosionan las superficies metálicas.

La supercavitación es una versión extrema de la cavitación. Por su efecto se origina una burbuja que envuelve al cuerpo móvil casi por completo. A velocidades mayores que 50 metros por segundo, los cavitadores de punta roma y sistemas de inyección de gas montados en la proa producen las bolsas de gas de baja densidad que llamamos supercavidades. Con un cuerpo esbelto y axisimétrico la supercavidad adquiere la forma de un elipsoide oblongo que empieza en el frente del cuerpo y se prolonga por detrás, siendo su longitud función de la celeridad del cuerpo.

Las cavidades elípticas resultantes se cierran enseguida bajo la presión del agua circundante, zona caracterizada por unos flujos complicados e inestables. La mayoría de las dificultades que se plantean en el modelado matemático de flujos supercavitantes surgen cuando se considera la zona de colapso o de cierre de las cavidades. Al no ser constantes las presiones del interior de las cavidades, se multiplican los problemas de análisis.

Modelización aparte, en tanto el agua toque sólo al cavitador los ingenios supercavitantes se moverán raudos dentro de las largas burbujas gaseosas con una resistencia mínima.

Supercavitación: avances

En los años cincuenta las investigaciones estadounidenses sobre supercavitación se centraron en las hélices de alta velocidad y en el desarrollo de hidroaletas. Andando el tiempo, la armada primó otras líneas de trabajo, con especial hincapié en la furtividad, en detrimento de las grandes velocidades. Por culpa de ese cambio de rumbo, la marina estadounidense carece de armas supercavitantes.

Para salvar ese hiato que nos separa de la armada rusa, la Oficina de Investigación Naval (ONR) en Arlington se ha empeñado en el desarrollo de armas supercavitantes, en particular proyectiles y torpedos.

La primera clase está representada por el Sistema de Limpieza de Minas Aerotransportado Rápido (RAMICS), un arma montada en un helicóptero que destruye minas marinas de superficie y subsuperficie mediante proyectiles supercavitantes. Estos, de 20 milímetros y punta plana, viajan estables por aire y mar; los dispara un arma de tiro rápido modificada con un dispositivo avanzado de asignación de blancos. (Se espera aumentar hasta 30 milímetros el calibre de los proyectiles RAMICS en servicio.) Se estudia la conveniencia de desplegar un sistema de armas de defensa cercana del tipo RAMICS montado en las cubiertas de buques para destruir los torpedos seguidores de estela.

El paso siguiente en la técnica de proyectiles supercavitantes será un sistema completamente submarino que empleará munición acuática adaptable de alta velocidad (AHSUM). Tales balas "de destrucción por impacto" supercavitantes se dispararían desde armas montadas en torretas de perfil hidrodinámico instaladas en la obra viva de submarinos sumergidos, buques de superficie o rastras antiminas remolcadas. Se espera que el AHSUM, gobernado por sonar, se convierta en el homólogo submarino del sistema de armas Phalanx de la marina estadounidense, arma rápida controlada por radar que protege a los buques de superficie contra misiles crucero.

Otro proyecto objeto de interés de la ONR es un torpedo supercavitante capaz de alcanzar los 200 nudos. Según Kam Ng, gerente del pro-

grama, en su camino se alzan obstáculos sustanciales de índole técnica y metodológica, que tienen que ver con la zona de lanzamiento, hidrodinámica, acústica, guiado y mando y propulsión, entre otros. NUWC Newport corre a cargo de la investigación aplicada y también de parte de la básica. El proyecto cuenta con el apoyo del Laboratorio de Investigación Aplicada (ARL) de la Universidad estatal de Pennsylvania (ARL/Penn State), la Universidad de Florida, Anteon Corporation y Lockheed Martin.

Respecto a los trabajos de dinámica de fluidos por ordenador (CFD) que acerca de este torpedo se efectúan en ARL/Penn State, "intentamos simular las condiciones en que el torpedo actuaría, que es el llamado régimen fluido bifásico con agua y gas a la vez", afirma Ng. "Hay que averiguar el comportamiento del agua y la forma de la cavidad de gas, amén de asegurarse de que ésta encierra al cuerpo en todo momento. Téngase presente que, una vez desbaratada la cavidad, aumenta la superficie mojada y disminuye en picado la velocidad."

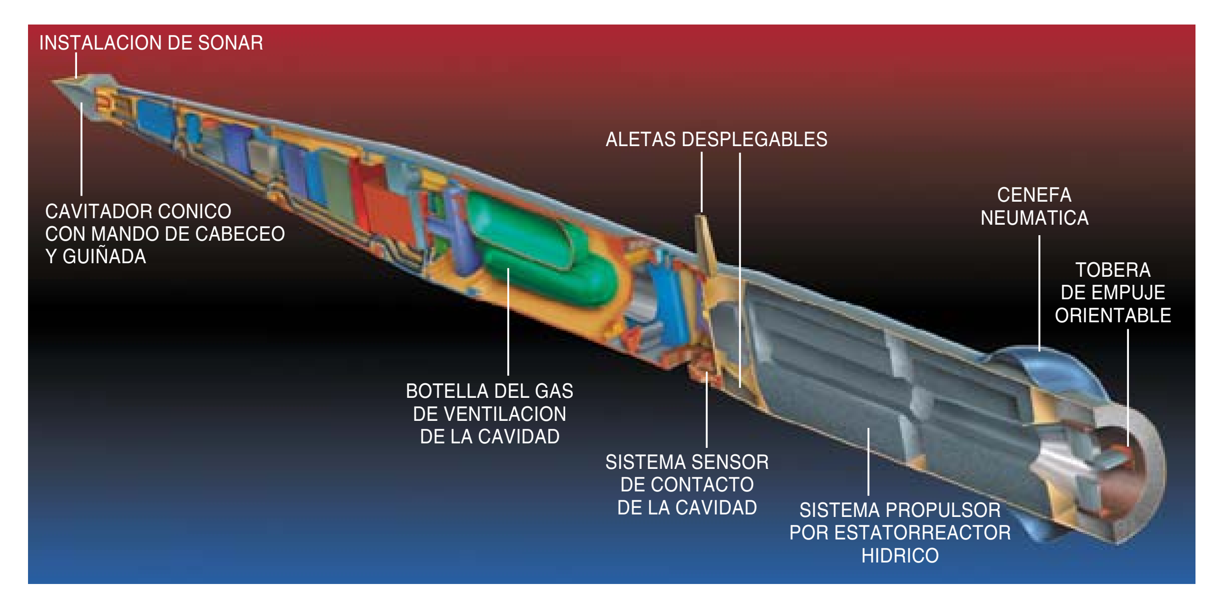
Hasta ahora el CFD está dando unos resultados bastante buenos, pero queda mucho trecho por recorrer, lo mismo en informática que en el conocimiento de la física subyacente. "En este caso, prosigue Ng, no estamos trabajando con un fluido newtoniano; se trata de algo más complejo que un simple flujo monofásico."

Torpedo supercavitante

Al ser el iniciador de los modelos existentes de ingenio supercavitante, el misil submarino Shkval es ideal para ilustrar las partes básicas de un diseño de primera generación. El torpedo, con una longitud presumible de más de 8 metros y una masa de unos 2700 kg, es "realmente un proyectil muy grande con un cohete en la cola", bromea Yuriy N. Savchenko, director científico del Instituto Ucraniano de Hidromecánica de Kiev, donde empezaron a desarrollarse la mayoría de los fundamentos de la técnica de armas supercavitantes.

En líneas generales, el arma consiste en un casco que contiene un cohete de combustible sólido y ahusado hacia la ojiva. Del centro de la popa sobresale la amplia boca de descarga de una tobera de cohete rodeada de ocho cilindros menores, que se cree son pequeños cohetes de arranque. Estos impulsan al Shkval hasta la velocidad de supercavitación, momento en el que se enciende el motor principal. Alojado entre dos de las toberas del motor de arranque se cree que hay un carrete de cable de guiado que se desenrolla conforme el torpedo se abre camino por el agua. Ese cable sirve para manejar el torpedo desde el submarino y controlar la detonación de la ojiva.

Para hablar de la parte delantera, hay que especular algo más. La punta del torpedo presenta un disco plano de forma circular o quizás elíptica. Es éste el imprescindible cavitador, que genera la cavidad de gas en la que se mueve el ingenio. La parte superior del disco cavitador estaría inclinada hacia adelante, proporcionando un "ángulo de ataque" que generaría la sustentación necesaria para el cuerpo de proa del artefacto. El borde del cavitador debe ser de canto vivo, pues así se crea la superficie de separación gas/agua más nítida o menos turbulenta, es decir, una cavidad "cristalina". Inmediatamente a popa del cavitador hay varios anillos de canales de ventilación que inyectan, en la burbuja de cavitación y para agrandarla, gas y vapor de escape del cohete. A unos dos tercios de la longitud desde la punta hacia atrás se disponen cuatro cilindros desplegables inclinados hacia popa. Estos, aunque podrían pasar por aletas, son en realidad patines tensionados por resortes que soportan la mitad de popa del



4. EL TORPEDO supercavitante del futuro podría incorporar toda una gama de técnicas innovadoras de cavitadores, sensores, control y propulsión.

torpedo, permitiéndole rebotar en la superficie interna de la cavidad. Los expertos occidentales creen que el Shkval realmente “precesiona” lentamente sobre el perímetro de la cavidad, rebotando una y otra vez en las paredes mientras avanza por el agua.

El Shkval se considera un tanto rudimentario. Sólo puede viajar en línea recta. Pero hay en la oficina de proyectos vehículos supercavitantes que podrán maniobrar dentro del agua. Para su gobierno se recurrirá al uso de superficies de control que traspasen la cavidad, tales como aletas y sistemas de empuje orientable, que son toberas direccionables para la descarga de los gases del motor. En los virajes, habrá que cuidar mucho que el cuerpo se mantenga dentro de la cavidad; si intentara salirse de ella, la fuerza del golpe contra la pared de agua circundante lo convertiría de repente en una “lata de refresco aplastada”, en imagen de Ivan Kirschner, ingeniero del Centro de Técnica Aplicada de Anteon en Mystic (Connecticutt).

“Además”, prosigue Kirschner, “las maniobras de cabeceo y guiñada tridimensionales podrían realizarse moviendo o rotando el cavitador del morro en dos planos a la vez, aunque tales ingenios serían más complicados”. Se ha pensado también en el empleo de artefactos con timones a proa e impulsión delantera.

Sostiene Kuklinsky, del NUWC, que los vehículos supercavitantes podrían ser agilísimos si las superficies de mando se coordinaran bien. La idea es desviar la cavidad hacia un costado para crear las fuerzas laterales necesarias con un cavitador de morro articulado o con superficies de mando y luego guiar el vehículo hacia ella. Si los sistemas de control de proa y popa funcionan en fase, de modo que la parte de cola siga las vicisitudes de lo que pase delante, podrían conseguirse virajes muy rápidos.

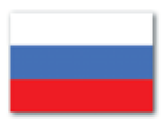
Parte de la solución a los problemas de control pasa por disponer de un bucle de control de realimentación en tiempo real, capaz de mantenerse al compás de lo que marquen las condiciones de la cavidad en la parte trasera del artefacto y reaccionar debidamente a los cambios medidos. Como los sistemas supercavitantes viajan sin apoyos dentro de burbujas gaseosas de baja densidad, sus colas suelen golpear contra la pared de las cavidades. Este es el fenómeno que los especialistas llaman “cacheteo de cola”, regularmente observado en fotografías de pruebas a gran velocidad de los ingenios supercavitantes. La ONR ha patrocinado el desarrollo de un sensor de “cacheteo de cola”: un sistema de monitorización basado en componentes microelectromecánicos que sigue la sucesión de contactos intermitentes de la cola con la cavidad.

A propósito de los vehículos supercavitantes del futuro conviene destacar cierto dato: la transición del viaje submarino normal al régimen supercavitante, y a la inversa, puede realizarse ventilando artificialmente una cavidad parcial para mantenerla y expandirla a través



5. ARMAS SUBMARINAS. La armada estadounidense está desarrollando lanzadores subacuáticos para torretas artilleras que se instalarían bajo la línea de flotación y dispararían proyectiles de “destrucción por impacto” contra minas, obstáculos, ingenios de superficie, torpedos buscadores, e incluso aviones de vuelo rasante y helicópteros.

La supercavitación en el mundo



RUSIA: Rusia, pionera mundial en la técnica de las armas supercavitantes, podría haber proseguido en su dilatada historia experimental en ese campo, se sospecha que un importante programa secreto sobre armas supercavitantes se lleva a cabo en el TsAGI, el afamado Instituto Central de Aerodinámica en Zhukovsky, donde se cree que se realizó buena parte de la ingeniería del misil submarino Shkval. Se acepta que los rusos fueron los primeros en alcanzar velocidades supersónicas bajo el agua. Afirman algunos que los ingenieros del TsAGI están investigando la posibilidad de desarrollar también submarinos supercavitantes.



UCRANIA: La técnica necesaria para el desarrollo del torpedo ruso Shkval salió del Instituto Ucraniano de Hidromecánica en Kiev, que en la época soviética estuvo dirigido por Georgy Logvinovitch, uno de los pioneros de la teoría de la supercavitación. Hay en esas instalaciones un sistema avanzado de pruebas en tanque de agua donde los modelos, anclados a un cable, son catapultados o propulsados a chorro mientras se les observa puntillosamente. Los investigadores del Instituto de Hidromecánica, conocidos por sus métodos matemáticos semianalíticos y extensos trabajos experimentales, han estado intercambiando información sobre la técnica de la supercavitación con sus colegas norteamericanos desde la caída de la Unión Soviética.



FRANCIA: Bajo la supervisión de la Dirección de Investigación, Estudios y Técnicas, Francia se ha volcado en los últimos diez años en el programa Action Concertée Cavitation. Fuentes fiables informan que el gobierno está interesado en las armas supercavitantes, bajo secreto militar. Francia podría haber adquirido a los rusos varios Shkval para su evaluación. En el Instituto Franco-Alemán de Investigaciones de Saint Louis se están realizando pruebas de prototipos de proyectiles antiminas supercavitantes lanzados desde el aire.

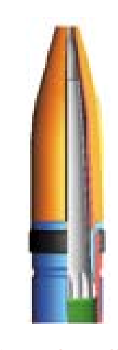


ALEMANIA: La Oficina Federal Alemana para la Técnica y Adquisiciones, en Coblenza, coopera con la armada estadounidense en un programa de desarrollo conjunto de nuevos diseños de cavitadores y modelado de sistemas buscadores para torpedos. Además, los ingenieros han avanzado en la construcción de un prototipo de torpedo supercavitante cuyas pruebas se espera que se inicien pronto en EE.UU.

Neutralización de minas

Las balas disparadas desde el aire contra un blanco marino que se sumerge salen despedidas rebotando o agotan su energía con sorprendente rapidez a consecuencia de la resistencia al avance o a las fuerzas hidrodinámicas laterales. Cuando la Oficina de Investigación Naval recibió el encargo de hallar un modo económico de impedir que las minas de superficie dañaran o destruyeran buques de muchos millones de dólares, recurrió a los proyectiles supercavitantes. El resultado fue el Sistema de Limpieza de Minas Aerotransportado Rápido (RAMICS). Operado desde un helicóptero, el RAMICS localiza minas submarinas mediante un sistema de lídar verde-azul de formación de imágenes, calcula su posición exacta, pese a la desviación de la luz por la refracción en el agua, y seguidamente le lanza una descarga de proyectiles supercavitantes que viajan, estables, por aire y mar. Esos proyectiles especiales contienen unas cargas que causan la deflagración, o estallido lento, de los explosivos de las minas.





6. PROYECTIL ANTIMINA. Los proyectiles supercavitantes disparados desde el aire, por encima de la superficie del océano, deben volar establemente tanto por el aire como por el agua, una gran dificultad para los ingenieros. La granada RAMICS (*que se muestra en parte*) fue desarrollada por C Tech Defense Corporation.

de las transiciones de velocidad. Así, una pequeña cavidad natural formada en la punta (a baja velocidad) puede "hincharse" hasta un tamaño que encierre al cuerpo entero. Al revés, pueden facilitarse las maniobras de frenado aumentando la burbuja con gases de inyección que mantengan y luego reduzcan lentamente su tamaño para anular de un modo gradual la velocidad.

Sistemas de propulsión avanzados

La mayoría de los vehículos supercavitantes autónomos, existentes o previstos, dependen de motores de tipo cohete para generar el empuje necesario. Pero los cohetes al uso comportan algunos inconvenientes graves: su alcance es limitado y el empuje decrece al aumentar la presión con la profundidad. Para superar el primero se estudia una nueva técnica de plantas motrices de alta densidad energética; el segundo podría salvarse empleando un tipo especial de técnica de hélice propulsor supercavitante.

La consecución de velocidades supercavitantes requiere mucha potencia. Para que el alcance de un cohete sea máximo, hay que quemar combustibles de alta densidad energética que proporcionan el mayor impulso específico. Según estima Savchenko, un motor cohete sólido puede tener un alcance máximo de algunas decenas de kilómetros y una velocidad pico de quizá 200 metros por segundo. Tras examinar los sistemas de propulsión basados en motores diesel, motores eléctricos, plantas atómicas, motores diesel rápidos y turbinas de gas, Savchenko llegó a la conclusión de que sólo las turbinas de gas de alto rendimiento y los sistemas de propulsión a chorro que quemen combustibles metálicos (aluminio, magnesio o litio), y que empleen agua de fuera borda (como oxidante del combustible y para refrigerar los productos de la combustión), poseerán un auténtico potencial para propulsar vehículos supercavitantes hasta altas velocidades.

El aluminio es el más energético de esos combustibles, produciendo una temperatura de reacción de hasta 1600 grados Celsius. La reacción puede acelerarse fundiendo (licuando) el metal y empleando vapor de agua. En un diseño posible de planta motriz, el calor de la cámara de combustión se utilizaría para fundir placas de aluminio a unos 675 grados C y también para vaporizar agua marina. Los productos resultan-



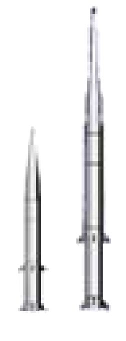
7. BALA SUPERSONICA. En 1997 un equipo investigador de la División Newport del Centro Naval de Guerra Submarina consiguió imágenes del disparo completamente sumergido de un proyectil supercavitante con una velocidad inicial de 1549 metros por segundo, superior a la velocidad del sonido en el agua.

tes de la combustión impulsarían la turbina de accionamiento de las hélices.

Según parece ese sistema ha sido ya desarrollado en Rusia. En EE.UU. hay también experiencia sobre esos tipos de sistemas. En el Laboratorio de Investigación Aplicada de la Universidad estatal de Pennsylvania opera un sistema "estatorreactor hídrico" quemador de aluminio, que fue desarrollado como planta de potencia auxiliar para un buque de superficie.

En el nuevo diseño norteamericano se añade aluminio en polvo a un remolino de agua marina generado en un combustor de torbellino. La rápida rotación provoca el mutuo rozamiento de las partículas, que desprende la capa inerte de óxido de aluminio que las cubre; al oxidarse el aluminio se inicia una reacción fuertemente exotérmica. El vapor a gran presión procedente de esa combustión se expande al salir por una tobera cohete o mueve una turbina que hace girar una hélice.

Demuestran los ensayos que la propulsión a hélice incrementa el empuje en un 20 por ciento, en comparación con la potencia del cohete, aunque en teoría sería posible que los propulsores de hélice duplicaran el empuje disponible. Se han ensayado diseños de un sistema propulsor de rotor de turbina con una "hélice de casco", o un par de hélices de casco contra rotativas que circunvalan el ingenio de manera que pueden llegar a la frontera entre gas y agua.



8. MISILES SUBMARINOS. La marina estadounidense investiga en proyectos de armas supercavitantes de largo alcance y alcance ampliado. La de la izquierda es un "rompe-combates no guiado de alcance medio"; la de la derecha es un "arma guiada de respuesta precoz de largo alcance."

Miedo al futuro

Sea lo que fuere lo que los años venideros reserven para las armas supercavitantes, éstas han dejado ya sentir su peso en todos los estados mayores y servicios de inteligencia.

De entrada han animado la investigación naval. Cuando se tuvo noticia de la existencia del Shkval, se dispararon las lucubraciones sobre su misión. Para unas fuentes de inteligencia occidentales, el Shkval debía permitir que los ruidosos submarinos de baja técnica diesel de la entonces Unión Soviética reaccionaran ante un ataque súbito por submarinos americanos, ultrasilenciosos y al acecho. Al percibir el ruido de las hélices del torpedo clásico, se lanzaría el Shkval para obligar a huir al enemigo o quizá para cortar el cable de guiado del torpedo atacante. El Shkval sería, en esa opinión, un arma letal submarina, dotada quizá de cabeza nuclear.

De acuerdo con otras fuentes informadas se trataría de un arma ofensiva, concebida para hacer estallar una carga nuclear de gran rendimiento dentro de un grupo de combate de portaaviones, eliminando así a toda una flota. Durante una guerra nuclear, podría incluso dirigirse contra un puerto o un objetivo terrestre costero. Otros han resaltado la carencia de contramedidas eficaces, lo que supone una desventaja considerable para las fuerzas navales occidentales.

Ante su pésima situación económica, Rusia ha puesto el Shkval en venta en las ferias de armamentos internacionales de Abu Dhabi y Atenas. Se da por descontado que Irán ha comprado varios. Unos cuarenta habría adquirido China de Kazahstan, con la amenaza consiguiente para las fuerzas navales americanas en el estrecho de Taiwan. Se sospecha que a bordo del hundido *Kursk* había un oficial de submarinos chino, para observar las pruebas de una nueva versión del Shkval.

El incidente del *Kursk*, el proceso Pope y la ambigüedad en torno a ambos refuerzan la idea de que el final de la guerra fría no ha alterado en modo alguno la competición clandestina de armas para asegurar una ventaja en cualquier conflicto futuro.

CIENCIA Y SOCIEDAD

Atención

y rendimiento visual

La vida cotidiana moderna —sobre todo en las grandes urbes— ofrece tal cantidad de información y estímulos, que la capacidad de atender a lo esencial y hacer caso omiso de lo accesorio reviste suma importancia. Si, como expone genialmente Borges en *Funes el memorioso*, el olvido es lo que posibilita el recuerdo y el pensamiento, en el caso de la percepción visual, la atención selectiva a los estímulos es lo que vuelve coherente e interpretable el caos de señales que es la "realidad".

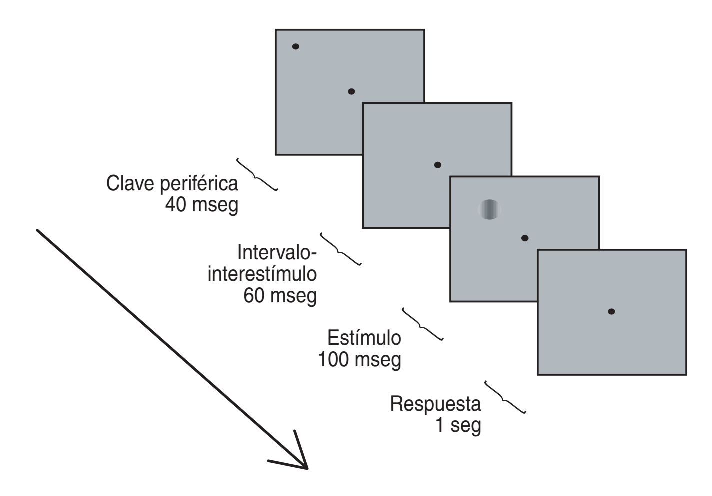
"Sospecho" —barrunta el narrador de *Funes*— "que en el abarrotado mundo de Funes no había sino detalles casi inmediatos".

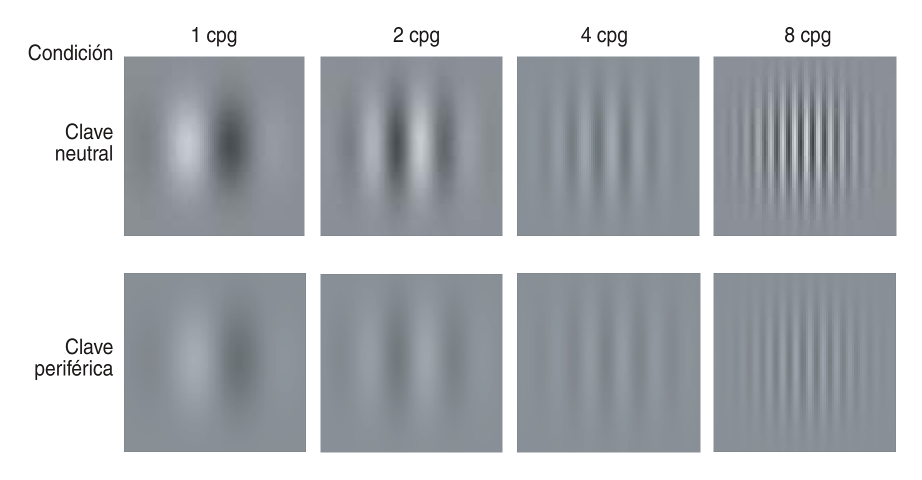
La expresión *atención visual* denota el proceso que nos permite seleccionar información y procesar prioritariamente ciertas posiciones espaciales u objetos del entorno visual. Atender a algo no es equivalente a mirarlo. De hecho, como ocurre a menudo en las fiestas aburridas, podemos estar mirando fijamente a alguien y al mismo tiempo estar buscando de manera más o menos subrepticia a otra persona más interesante en nuestro campo visual. (Se podría decir otro tanto de la *atención auditiva.*) Esta disociación entre la mirada y la atención se llama *atención encubierta*: sin la necesidad de mover los ojos, llevamos a cabo un procesamiento selectivo de la información visual de cierto lugar.

Se sabe que la atención mejora el rendimiento en muchas tareas visuales, como la búsqueda visual, la segmentación de texturas y la detección de letras. No obstante, el proceso mediante el cual la atención produce esa mejora es tema de debate. La pregunta "¿Cómo afecta la atención la apariencia de los objetos?" fue central para los fundadores de la psicología experimental y de la psicofísica sensorial. A fines del siglo XIX y principios del XX, mientras que Ebbinghaus, Wundt, Titchener y Mach, entre otros, sostenían que la atención afecta a la intensidad de la sensación, Fechner y otros negaban esta idea. Defendía William James que la atención intensifica la impresión sensorial, pero no la distorsiona. La pregunta sigue siendo central en los campos básicos de percepción, psicología cognitiva y neurofisiología.

Según el consenso científico actual, la atención puede mejorar el rendimiento en tareas visuales de varias maneras; por ejemplo, reduciendo el efecto del ruido (interno y externo) o produciendo cambios en los criterios de decisión. Se ha propuesto también la posibilidad de que la atención intensifique la representación de la señal.

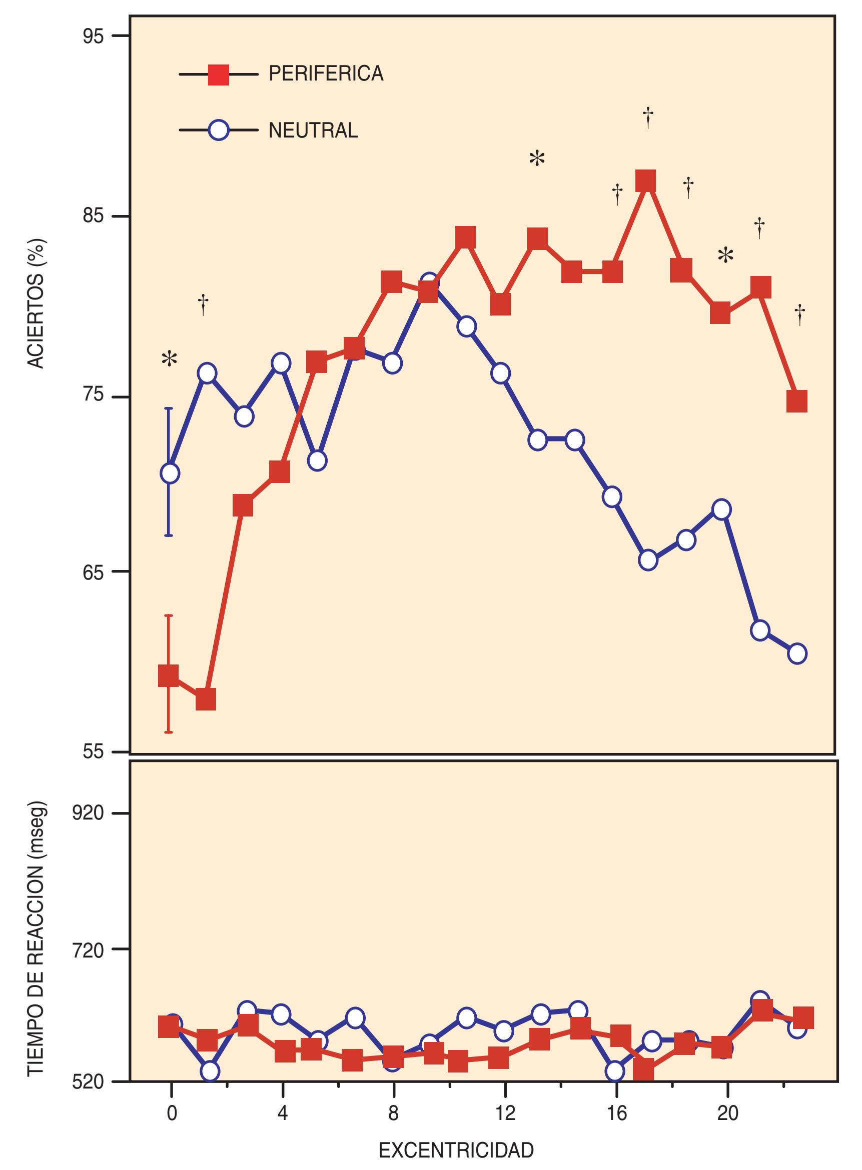
Aunque los tres factores deben intervenir, ya sea conjuntamente ya sea por separado, en distintas ta-





1. Este esquema ilustra el contraste necesario para discriminar la orientación de estímulos Gabor de diferentes frecuencias espaciales. Como se puede observar, el contraste de la señal es menor cuando el estímulo es precedido por la clave periférica que por la clave neutral para lograr el mismo rendimiento visual





2. Esta gráfica ilustra que la clave periférica mejoró el rendimiento de los observadores cuando la textura-objetivo apareció en localidades excéntricas, pero cuando apareció en localidades centrales esta clave empeoró el rendimiento

reas, mis alumnas de doctorado Yaffa Yeshurun y Cigdem Penpeci-Talgar y yo hemos podido aislar condiciones experimentales en las que los efectos de la atención sólo pueden atribuirse a la intensificación de la representación de la señal. Además, hemos aportado pruebas de que la atención afina la resolución espacial del sistema visual; es decir, nos permite discernir detalles con más claridad.

Antes de describir nuestros hallazgos experimentales convendría presentar dos conceptos más: 1) a medida que la excentricidad retiniana aumenta la resolución espacial y la sensibilidad al contraste disminuyen; 2) la atención encubierta puede activarse de manera controlada en los experimentos mediante el uso de una *clave periférica*. Esta clave aparece muy brevemente en la pantalla experimental indicando el lugar donde se presentará el estímulo objetivo, pero sin suministrar información sobre la naturaleza del estímulo.

La clave periférica actúa de manera automática, sus efectos son transitorios y son más pronunciados a los 100-120 milisegundos. En la condición control, una *clave neutral* indica que el estímulo tiene la misma probabilidad de aparecer en cualquier posición. La breve presentación de los estímulos hace imposible que el sujeto mueva sus ojos durante cada ensayo; asegura, pues, la activación de la atención encubierta.

Para investigar si la atención intensifica la representación de la señal, utilizamos los estímulos más simples para el sistema visual, los estímulos Gabor (*figura 1*), cuya frecuencia espacial es de 0,5 a 12 ciclos/grado. En cada ensayo el estímulo aparece en la pantalla del ordenador durante 100 milisegundos en una de 8 posibles posiciones equidistantes del centro. Los observadores indican la orientación del estímulo (derecha o izquierda, vertical u horizontal). La discriminación es superior cuando al estímulo le precede la clave periférica que cuando le antecede la clave neutral. Las condiciones experimentales, el hecho de que los observadores detecten la presencia del estímulo y localicen su posición perfectamente, y un modelo de detección de señales aplicado a nuestros datos, nos permiten concluir que el rendimiento mejora porque la atención intensifica la señal.

En la tarea de búsqueda visual, un observador se sienta frente a un ordenador y mira la pantalla donde aparece el estímulo objetivo en la mitad de los ensayos. En cada ensayo, el observador responde —tan rápida y acertadamente como pueda— si el estímulo objetivo apareció o no. Dado que el

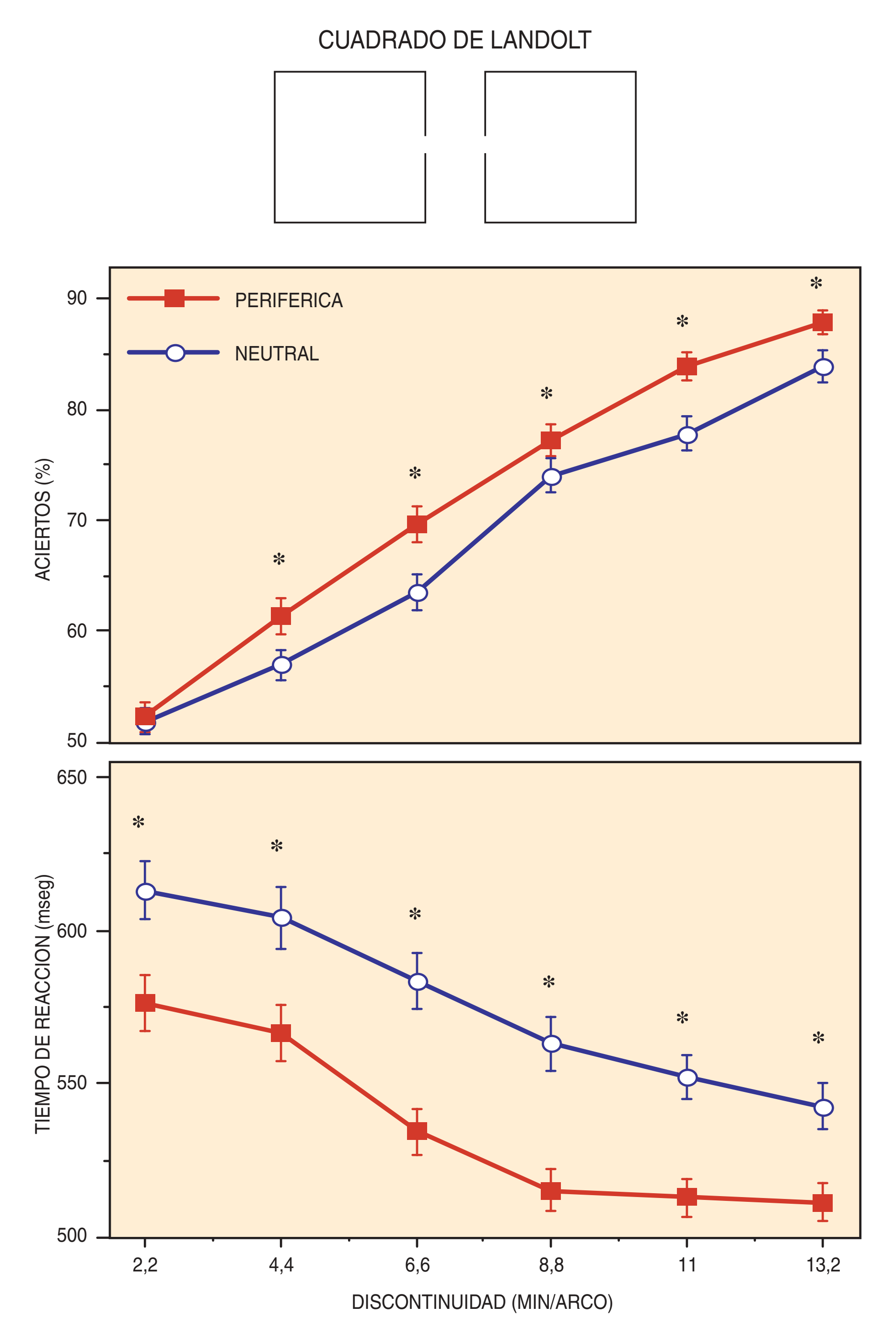
efecto de la atención en el rendimiento es más pronunciado en las posiciones más excéntricas, donde la resolución espacial es menos aguda, postulamos que la atención afina la resolución espacial.

Para investigar esta hipótesis exploramos los efectos de la atención en tres tareas de agudeza visual que requieren discriminaciones espaciales finas. Por ejemplo, los observadores discriminaban si el estímulo 'cuadrado Landolt' tenía una discontinuidad del lado derecho o izquierdo. Los observadores respondieron más lentamente y con menos eficacia cuando el estímulo aparecía en las posiciones más excéntricas, donde los campos receptivos de las neuronas son mayores y la resolución espacial, menor. El rendimiento fue más rápido y certero si al estímulo le precedía la clave periférica que si lo hacía la clave neutral (*figura 3*).

En otro estudio utilizamos una tarea de segregación de texturas que requiere la integración de información de baja resolución. A diferencia de lo que ocurre en la mayoría de las tareas visuales, en ésta el rendimiento es inferior en la fóvea, donde la resolución resulta ser demasiado fina, que en excentricidades intermedias, donde la resolución espacial alcanza el nivel idóneo. En una tarea de elección forzada los observadores tienen que identificar cuál de los dos intervalos contiene una textura-objetivo (por ejemplo, un subgrupo de líneas inclinadas hacia la derecha).

Hasta ahora, todos los modelos de atención visual predicen que la atención mejora el rendimiento; al demostrar que la atención empeora el rendimiento en una tarea donde una resolución espacial demasiado fina deteriora el rendimiento, presentamos una prueba sólida de que la atención afina la resolución espacial (*figura 2*).

De la misma manera que si acortáramos la distancia entre el estímulo y nuestros ojos, la atención intensifica la señal y nos permite discernir más detalles de la información. Esta capacidad de discernimiento fino es casi siempre deseable; en algunas situaciones, no



3. Esta gráfica ilustra que la clave periférica mejoró el rendimiento de los observadores cuando discriminaban qué lado del cuadrado contenía una discontinuidad

obstante —cuando uno se encuentra ante un cuadro puntillista, por ejemplo— la resolución espacial intensificada puede constituir una desventaja porque imposibilita o dificulta la percepción global del fenómeno.

¿Qué influencia ejerce la atención sobre la percepción visual? Hemos podido contribuir a la respuesta a esta vieja pregunta: la atención encubierta afecta las primeras etapas de procesamiento de información visual de dos maneras, intensifica la representación de la señal y afina la resolución espacial del sistema visual.

MARISA CARRASCO QUEIJEIRO
Dpto. de Psicología
y Neurociencia
Universidad de Nueva York

Simetría floral

Mutantes naturales

Algunas flores, amapolas y prímulas entre ellas, tienen todos los pétalos y todos los estambres idénticos entre sí. Podemos trazar numerosos ejes de simetría que dividen la flor en dos partes iguales. Los botánicos llaman a estas flores radialmente simétricas o *actinomorfas*.

Otras flores, citemos genistas y pensamientos, muestran distintos tipos de pétalos y estambres. Sólo se puede trazar un eje de simetría que divide a la flor en dos partes iguales. Estas flores reciben el nombre de bilateralmente simétricas o *zigomorfas*.

Las flores zigomorfas aparecieron tarde en la evolución de las plantas angiospermas, pero conocieron un enorme éxito adaptativo. Por ello hay ahora más especies con este tipo de flores que con flores actinomorfas. Una explicación de semejante triunfo podría hallarse en los mecanismos de polinización. Las flores zigomorfas tienden a desarrollarlos más especializados y eficientes: su forma favorece el acceso de ciertos animales, los pétalos ventrales están a menudo transformados en *plataformas de aterrizaje* con señales que orientan al polinizador en su entrada a la flor, y la forma y tamaño de los estambres y carpelos aseguran que el contacto del polinizador con el polen y el estigma sea máximo.

En la naturaleza aparecen a veces espontáneamente flores simétricas en plantas de especies que normalmente desarrollan flores asimétricas. Este es el caso del ejemplar de *Linaria vulgaris* mostrado en la figura b cuyas flores presentan —en lugar de un único espolón en el pétalo ventral como las flores típicas de su especie (*figura a*)— cinco espolones, uno en cada uno de sus pétalos.

Se trata de un fenómeno descrito ya en el siglo XVIII por Carl Linneo (*figura c*), a quien este espécimen causó bastantes quebraderos de cabeza. Para Linneo, las especies, creadas por Dios, eran inmutables. Esta planta le resultaba, pues, tan inexplicable "como si una vaca diera a luz una ternera con cabeza de lobo" (*sic*). La llamó *Peloria*, término griego para monstruo. Con el tiempo, Goethe, Darwin, de Vries y otros dedicaron su atención a peloria y describieron mutantes *pelóricos* encontrados en poblaciones naturales de otras especies.

Gracias al trabajo de Coen y su equipo, del Centro John Innes en Norwich, ahora sabemos que uno de los genes que controlan la generación de la asimetría floral es *cycloidea*, clonado y caracterizado en su laboratorio. El gen *cycloidea* actúa desde un momento muy temprano del desarrollo floral y determina que los primordios de pétalos y estambres dorsales crezcan de forma diferente de los pétalos y estambres ventrales.

Cuando *cycloidea* y otro gen emparentado, *dichotoma*, no funcionan de modo normal, por estar mutados, todos los pétalos y estambres de la flor son como los ventrales de la flor silvestre. La flor es, entonces, regular.

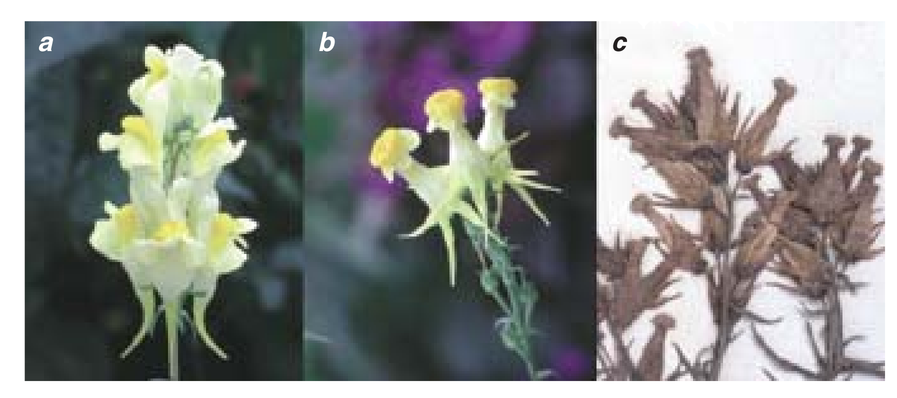
El gen *cycloidea* se aisló en una especie modelo, *Antirrhinum majus*, o boca de dragón. ¿Podía generalizarse lo afirmado en el apartado anterior a otras especies con flores asimétricas? En busca de respuesta nos propusimos averiguar si peloria era un mutante *cycloidea*. Si las plantas de *Linaria vulgaris* con flores simétricas tenían mutado el gen *cycloidea*, cabría inferir que el gen normal estaba implicado en la generación de la asimetría floral.

Aislamos el gen *cycloidea* de *Linaria* y observamos que, en plantas silvestres, aquél actuaba de forma similar al gen de *Antirrhinum*. Luego comprobamos que, en peloria, *cycloidea* se hallaba inactivo. Ello sugería que peloria era, en efecto, un mutante para el gen *cycloidea*.

Procedimos a estudiar el origen de la mutación. De ordinario un gen mutante presenta un error en su secuencia de ADN. Por culpa del fallo, el gen no actúa en el lugar y momento adecuados, o bien la proteína codificada resulta defectuosa. Para nuestra sorpresa, el gen *cycloidea* de peloria, aunque inactivo, no experimentaba ninguna modificación en su secuencia de ADN, sino que aparecía densamente metilado. También están metiladas regiones cromosómicas sin actividad transcripcional como por ejemplo los telómeros y centrómeros.

La incorporación de grupos metilo (—CH_3), o metilación, constituye una alteración reversible que confiere al ADN un carácter compacto, menos accesible a la maquinaria celular. Las plantas recurren a la metilación como mecanismo de defensa genómica para mantener inactivos genes defectuosos y secuencias invasoras (transposones y virus).

Los genes normales de la planta no están metilados, pues con ello



Inflorescencia de Linaria vulgaris *silvestre* (a). *La flor de* Linaria *es bilateralmente simétrica. El característico espolón de su pétalo ventral acumula néctar que atrae a los polinizadores. Inflorescencia de* Linaria vulgaris, *peloria* (b). *Sus flores son radialmente simétricas: todos los pétalos tienen espolones como el del pétalo ventral de la flor silvestre. Pliego del herbario de Linneo —actualmente guardado en la Sociedad Linneana de Londres— que muestra el ejemplar original de peloria* (c)

se inactivarían o *silenciarían*. En peloria había ocurrido un error celular; el gen *cycloidea* —aunque potencialmente funcional— estaba metilado y silenciado, dando lugar a un mutante aparente o *epimutante*. A diferencia de las mutaciones, cambios irreversibles en la secuencia de ADN, las epimutaciones son cambios reversibles —el ADN se puede desmetilar— y en la mayoría de los casos no heredables. De ahí que hasta entonces no se hubiera dado importancia a las epimutaciones desde el punto de vista evolutivo.

Sin embargo, el hecho de que la base molecular de peloria, el primer variante natural descrito en plantas, sea una epimutación sugiere que el fenómeno podría ser más frecuente de lo imaginado.

Hemos demostrado, por otro lado, que en peloria la metilación, aunque reversible, es estable y heredable. Y no se olvide que el ADN metilado constituye por sí mismo una fuente de mutación, ya que es más propenso a generar alteraciones en la secuencia de ADN. Todo ello sugiere que tal vez las epimutaciones desempeñan un papel evolutivo importante.

PILAR CUBAS
Centro Nacional de Biotecnología,
I.N.I.A., Madrid

Terapia mediante captura de neutrones

Aplicaciones de las fibras de neutrones

En la lucha sin cuartel contra el cáncer pudiera ocupar pronto un puesto destacado la terapia mediante captura de neutrones por boro (TCNB). Dicha técnica se basa en la destrucción de las células cancerosas por energéticos productos de las reacciones nucleares que se desencadenan al ser capturados los neutrones por el boro aplicado previamente al tumor.

La TCNB utiliza neutrones térmicos, con energías del orden de 0,02 electronvolt. Aunque los neutrones térmicos se toleran mucho mejor que los más energéticos, importa minimizar la cantidad de los primeros que puedan recibir los tejidos sanos que rodean al tumor. Ahora bien, para que el flujo de neutrones térmicos resulte eficaz, ha de ser, al menos, de 5×10^8 neutrones por centímetro cuadrado y segundo. Un flujo inferior exigiría una prolongación excesiva del período de suministro del haz de neutrones, con secuelas negativas para el paciente.

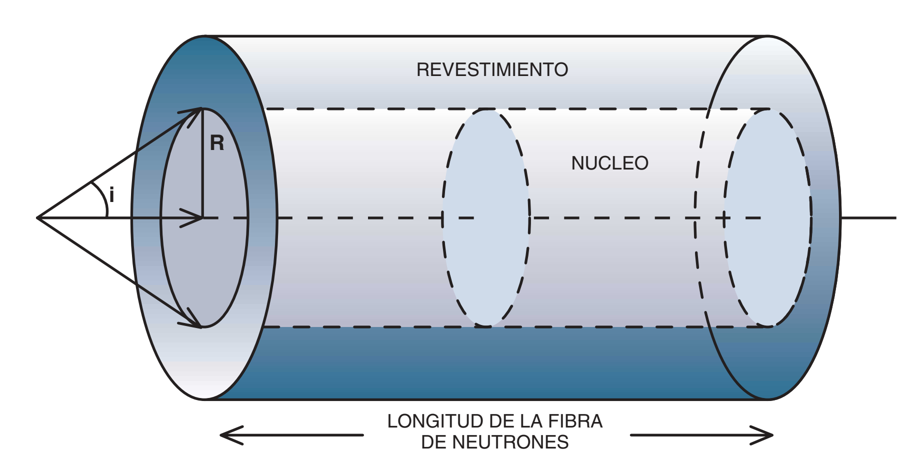
Los haces de neutrones térmicos, procedentes de un reactor nuclear, se podrían propagar confinados a lo largo de una fibra delgada, a la manera en que lo hace la luz (fotones) a través de una fibra óptica. Para entender su comportamiento, imaginémonos una fibra formada por dos cilindros coaxiales, uno interno (núcleo) y otro externo (revestimiento). El revestimiento podría ser de níquel o hierro; el núcleo, de aluminio, dióxido de silicio o aire (fibra hueca). El diámetro total de la sección transversal es de unos milímetros. El flujo de neutrones térmicos confinados, que habrían penetrado y se propagarían a lo largo del núcleo de la fibra, estaría controlado por el propio núcleo y podrían focalizarse hacia la zona que se desease. En la aplicación a la TCNB, la fibra permitiría concentrar el flujo de neutrones térmicos de forma selectiva en la zona tumoral, con menoscabo mínimo de la zona sana circundante.

Merced al avance de la técnica se han construido lentes de neutrones y sistemas para guiar y focalizarlos mediante haces de múltiples fibras capilares. Se espera, además, que las nuevas fuentes de neutrones estén basadas en aceleradores de alta energía, de pulsos.

Los haces de partículas de alta energía, procedentes de un acelerador, bombardean un blanco de metal pesado; la reacción nuclear resultante genera neutrones que se moderan para reducir su energía. El resultado final es un haz pulsado de neutrones, con energías en el rango de los milielectronvolt, que no tiene un flujo constante en el tiempo, sino variable.

Aunque el flujo medio de los neutrones procedentes de fuentes pulsadas es más bajo que en los haces constantes generados en reactores nucleares, podría quizás aplicarse en radioterapia de tumores. Con ello adquirirían interés creciente los dispositivos que permitan concentrar haces de neutrones en pequeñas regiones del espacio con un flujo suficiente.

MARÍA LUISA CALVO
Departamento de Optica,
Facultad de Ciencias Físicas,
Universidad Complutense
Madrid



Posible geometría de una fibra de neutrones. El revestimiento puede ser de níquel o hierro y el núcleo de aluminio, dióxido de silicio o aire (fibra hueca). Si la longitud es de 10 cm, R *es el radio del núcleo (inferior a 100 micras) y hay incidencia de un haz de neutrones, el ángulo* i *de aceptancia para confinamiento es muy pequeño, del orden de centésimas de minutos de arco. El confinamiento, por tanto, no es muy crítico*

De cerca

Texto y fotos: Josep-Maria Gili, Rafel Coma y Sergio Rossi

Instrumentación sumergida

Durante la última década se han multiplicado las posibilidades instrumentales con que cuenta el estudio de los organismos marinos. Desde que la escafandra autónoma se convirtió en un equipamiento habitual en los años sesenta del siglo XX, la instrumentación utilizada ha ganado en refinamiento. Los equipos actuales de medición, registro y observación permiten trabajar casi en las mismas condiciones en el mar que en los acuarios o laboratorios.

Si de zonas litorales poco profundas se trata, podemos ya conocer la actividad, metabolismo o alimentación en tiempo real de muchos organismos. Los avances se han centrado, sobre todo, en el estudio de los organismos sésiles, pues permiten ser manipulados sin sacarlos de su hábitat. Mediante cámaras fotográficas o de vídeo instaladas en el lecho marino seguimos los ritmos de actividad y contemplamos eventos que requerirían largas horas o días de observación continua.

El mayor desarrollo lo han experimentado los aparatos que registran las corrientes (correntímetros) o toman en continuo datos oceanográficos (temperatura, salinidad, etc.). Con otros equipamientos, y mediante la inclusión durante pocas horas de los organismos en campanas, nos es dado evaluar su respiración y alimentación en condiciones naturales. En las fotografías se muestran sólo algunos ejemplos de aparatos utilizados por investigadores del Instituto de Ciencias del Mar (CSIC) de Barcelona y del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona. De la instrumentación depende, a la postre, el progreso del conocimiento de los ecosistemas litorales en particular y de la oceanografía en general.

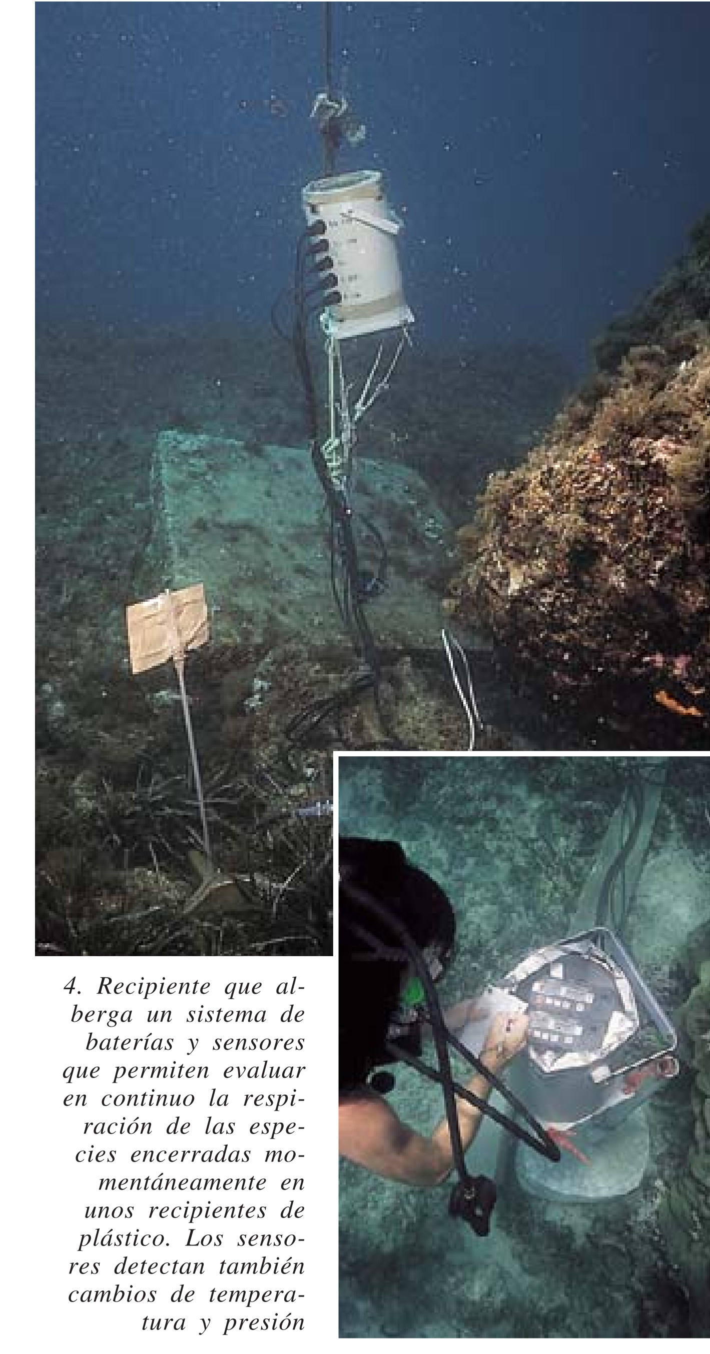


1. Buceador inspeccionando instalaciones fijas mediante cuerdas señalizadas que permiten un seguimiento muy preciso del crecimiento y evolución de las comunidades bentónicas

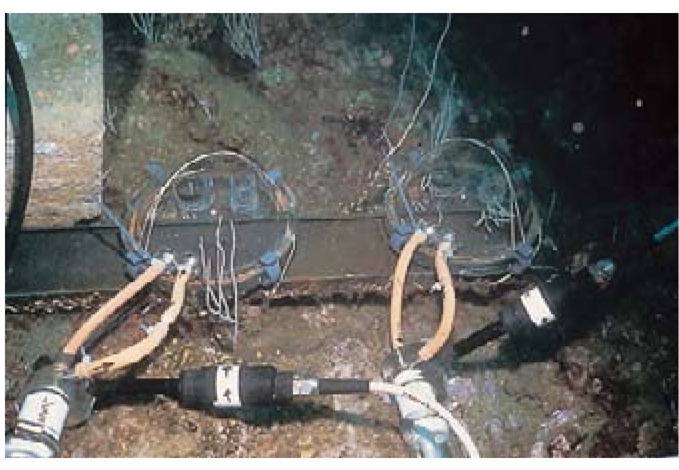


2. Trampas de sedimentación instaladas a 35 m de profundidad para evaluar los procesos de sedimentación y de aporte de materia orgánica a los fondos marinos. Se alcanza una precisión de días a semanas

3. Instalación de un correntímetro tipo Doppler para recoger durante semanas medidas de dirección e intensidad de la corriente a lo largo de un transecto y cada metro, desde el fondo hasta la superficie



4. Recipiente que alberga un sistema de baterías y sensores que permiten evaluar en continuo la respiración de las especies encerradas momentáneamente en unos recipientes de plástico. Los sensores detectan también cambios de temperatura y presión



5. Campanas de incubación diseñadas para mantener en óptimas condiciones los organismos y determinar sus tasas de alimentación. Las campanas se mantienen con sistemas de bombas y sensores que garantizan la circulación continua de agua en el interior de las campanas



6. Correntímetro avanzado para medir la intensidad y dirección de la corriente en un punto cada segundo. Dada la simplicidad de su diseño, apenas molesta a los organismos de alrededor. Constituye uno de los sistemas más eficaces para evaluar flujos a alta resolución


entiendo
lo que
quieres...

La Red semántica

Contenidos de nuevo tipo van a desencadenar una avalancha de posibilidades que revolucionarán Internet

Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila

Los Beatles anunciaban a todo volumen desde el equipo musical que "Nosotros lo podemos resolver" cuando sonó el teléfono. En cuanto Germán descolgó, el aparato telefónico se encargó de bajar el nivel sonoro, dirigiendo un mensaje a todos los equipos locales provistos de mando de volumen. Era su hermana Lucía, que llamaba desde la consulta del médico: "Mamá tiene que ir a un especialista y después someterse a varias sesiones de fisioterapia. Cosa de un par de días a la semana. Voy a encargar a mi agente que establezca las citas." Germán se ofreció inmediatamente para ayudar en lo necesario.

Lucía, desde la consulta del médico, dio instrucciones a su agente de la Red semántica mediante su navegador portátil. Al cabo de unos instantes, el agente había obtenido del agente del médico la información necesaria sobre el **tratamiento prescrito**, había consultado varias listas de **profesionales**, y verificado cuáles pertenecían al **seguro médico** de su madre en **un radio de 30 kilómetros** del **domicilio** de ésta, y había recibido **valoración de excelente** o **muy bueno** por servicios de evaluación de calidad dignos de confianza. El agente empezó entonces a buscar concordancias entre las **horas de cita previa** de que disponían estos profesionales (proporcionados por los agentes de cada uno de ellos desde sus sitios en la Red) y los escasos huecos con que contaban los atareados Germán y Lucía. (Las palabras clave resaltadas denotan términos cuya semántica, vale decir, cuyo significado, le fue definido al agente a través de la Red semántica.)

Al cabo de algunos minutos, el agente había confeccionado un posible plan. A Germán no acabó de gustarle, porque para llevar a su madre hasta el Hospital Clínico había que atravesar la ciudad, y al regreso sería hora punta. Volvió a instruir a su agente para que repitiese la búsqueda con preferencias más estrictas de **localidad** y **hora**. El agente de Lucía, que para la tarea actual tenía **plena confianza** en el agente de Germán, se puso automáticamente a su servicio; le proporcionó certificados de acceso y atajos hasta los datos que había ya previamente clasificado.

El nuevo plan fue expuesto casi al momento: había otra clínica mucho más próxima y a horas más tempranas; constaban, empero, dos notas de advertencia. En primer lugar, Germán tendría que cambiar algunas de sus citas profesionales **menos importantes**. Les echó un vistazo: no habría problema. La segunda mencionaba que en la lista de profesionales facilitada por el seguro médico no constaba este profesional bajo el epígrafe **fisioterapeutas**: "Tipo de servicio y cobertura del seguro verificada por otros medios", le aseguró el agente. "¿Detalles?"

Lucía consignó su asentimiento más o menos cuando Germán empezaba a murmurar "¡Ahórramelos!" y todo quedó arreglado.

Expresión del significado

Germán y Lucía no pueden servirse de tales agentes en la Red (o Telaraña) de nuestros días, pero sí podrían hacerlo en la Red semántica hacia la que seguramente evolucionará aquélla en el mañana. La mayor parte de cuanto actualmente contiene la Red está concebido para ser leído por personas, no para ser manipulado con sentido por programas informáti-

Los autores

TIM BERNERS-LEE, JAMES HENDLER y ORA LASSILA están atraídos por las posibilidades que ofrece la Red semántica. Berners-Lee es director del Consorcio de la Red (World Wide Web Consortium, o W3C) e investigador en el Laboratorio de Ciencias de la Computación en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Cuando inventó la Telaraña, o Red de redes, en 1989, quería que contuviera más elementos semánticos de lo hoy habitual. Hendler es profesor de informática en el Colegio Park adscrito a la Universidad de Maryland, donde ha investigado sobre representación de conocimientos en el contexto de la Red durante bastantes años. Ha desarrollado el lenguaje SHOE, el primer lenguaje de representación de conocimientos residente en la Red. Lassila es investigador titular en el Centro Nokia en Boston y miembro del consejo asesor del W3C. Fue uno de los autores de la especificación del RDF para el W3C.

cos. Hemos adiestrado a los ordenadores para examinar las páginas, cuyos componentes saben separar y manipular —un titular aquí, un hipervínculo allá—, pero las máquinas carecen de métodos fiables para procesar los aspectos semánticos: ésta es la página de Fisioclínica de los doctores Martín y Hernando, y este vínculo lleva al historial profesional del doctor Martín.

La Red semántica aportará estructura al contenido significante de las páginas de la Red; creará un ambiente en el que los agentes informáticos, que irán visitando una página tras otra, realizarán con presteza tareas complejas por encargo de los usuarios del sistema. Llegado a la página de la clínica, tal agente no sólo sabrá que la página contiene términos clave como "tratamiento, medicina, fisioterapia", sino también que el doctor Martín **consulta** en esta **clínica** los **lunes**, **miércoles** y **viernes**, que el *script* o 'guión' acepta **intervalos de fechas** en el formato **dd-mm-aa** y responde con **horas de cita**. Podrá "enterarse" de todo ello sin necesidad de poseer una inteligencia artificial. El contenido semántico quedó codificado en la página de la clínica cuando sus administradores le dieron forma valiéndose de programas ya prestos para escribir páginas de la Red semántica, a la vez que enumeraban los recursos de la clínica en el sitio que mantiene en la Red el Colegio Profesional de Fisioterapeutas.

La Red semántica no constituye una Red independiente de la actual, sino una ampliación; una Red en la cual la información está dotada de significados bien definidos, con el fin de que la coordinación del trabajo entre humanos y ordenadores sea más completa. Se han dado ya los primeros pasos para imbricar la Red semántica en la estructura de la Red ya existente. En un futuro no lejano, estos desarrollos introducirán prestaciones nuevas e importantes, al lograr que las máquinas multipliquen su capacidad de procesar y "comprender" los datos que hoy se limitan a exhibir en la pantalla.

En su universalidad tiene la Malla Máxima Mundial su nota principal. La potencia de los vínculos de hipertexto es que permiten "conectar cualquier cosa con todo". Por lo tanto, la técnica de la Red no debe discriminar entre el borrador apresurado y la prestación más depurada, entre la información comercial y la académica, ni entre culturas, idiomas, medios de comunicación y así sucesivamente. La información varía a lo largo de muchos ejes. Uno de ellos es la diferencia entre la información producida para uso humano y la dirigida a máquinas. En un extremo de la escala se encuentran desde el anuncio televisivo de cinco segundos hasta la poesía; en el otro están las bases de datos, los programas informáticos y las señales emitidas por dispositivos sensores. Hasta ahora, la Red se ha desarrollado con suma rapidez, pero concebida mucho más como medio de proporcionar documentos a los humanos que para la manipulación de datos e informaciones procesables de forma automática. La Red semántica aspira a llenar esta deficiencia.

La Red semántica, al igual que Internet, será descentralizada. Tales sistemas "retiformes" han despertado enorme interés, y en el presente resulta difícil o imposible pronosticar sus beneficios. La descentralización obliga a componendas: la Red tuvo que arrojar por la borda la imposición de coherencia total entre todas sus interconexiones, e introducir el denostado mensaje "Error 404: Not Found". Tal sacrificio hizo posible un crecimiento exponencial.

Panorámica / *Red semántica*

- Hasta la fecha, la Red se ha desarrollado con suma rapidez, pero la información y los documentos que contiene están concebidos para ser leídos por personas, no para manipulación automática. Al enriquecer sus páginas con datos destinados a ordenadores y añadir documentos creados exclusivamente para ordenadores, la Red se transformará en la Red semántica.
- Los ordenadores averiguarán el significado de los datos semánticos siguiendo hipervínculos hasta las definiciones de términos-clave y de las reglas para razonar lógicamente con ellas. La infraestructura resultante estimulará el desarrollo de servicios automatizados en la Red; por ejemplo, agentes sumamente funcionales.
- Los usuarios no necesitarán especiales conocimientos para componer páginas de la Red semántica y añadir nuevas definiciones y reglas valiéndose de programas ya preparados que resolverán las tareas de anotación semántica.

La representación del conocimiento

Para que la Red semántica funcione, los ordenadores han de tener acceso a recopilaciones de información debidamente estructuradas y a conjuntos de reglas de inferencia que puedan utilizar para efectuar razonamientos automáticos. Tales sistemas se han venido estudiando en inteligencia artificial desde mucho antes de la creación de la Red. La representación del conocimiento, nombre que suele recibir esta técnica, se encuentra en la actualidad en un estado comparable con el del hipertexto an-

1. LAS BUSQUEDAS EN LA RED devuelven un volumen desmesurado de aciertos completamente irrelevantes, que exigen al usuario mucho trabajo de filtrado manual. Por ejemplo, en una búsqueda basada en la palabra clave "cook" el ordenador no tiene forma de saber si estamos buscando un cocinero, información sobre la forma de cocinar algún plato, un lugar, una persona o una empresa o entidad cuyo nombre contenga la palabra "cook". El problema reside en que, para el ordenador, la palabra "cook" carece de contenido semántico, es decir, no tiene significado.

tes del advenimiento de la Red: es, de cierto, una buena idea, de la que existen plasmaciones de interés. Aunque contiene en germen importantes aplicaciones, para que manifieste con plenitud sus posibilidades ha de quedar vinculada a un sistema global.

Los sistemas tradicionales de representación del conocimiento han sido, de ordinario, sistemas centralizados, que exigen a todos sus usuarios que compartan exactamente la misma definición de conceptos comunes, como "padre" o "vehículo". Pero el control central resulta agobiante; y, por otra parte, si se aumentan el tamaño y alcance de tales sistemas pronto resultan imposibles de manejar.

Sistemas que, por otra parte, suelen imponer estrictos límites a las preguntas que se pueden plantear al ordenador, para que éste responda fiablemente. El problema tiene reminiscencias del teorema de Gödel en matemáticas: en todo sistema de complejidad suficiente para ser útil hay lugar para preguntas que no admiten respuesta; para algo así como variantes muy refinadas de la paradoja fundamental "Esta frase es falsa". Con el fin de eludir tales problemas, los sistemas tradicionales de representación del conocimiento tenían cada uno un sistema estricto y peculiar de reglas idiosincrásicas para efectuar inferencias a partir de sus datos. Por ejemplo, un sistema de parentesco que operase sobre una base de datos formada por árboles genealógicos, podría contener la regla "la esposa de un tío es una tía". Aun cuando los datos pudieran transferirse de un sistema a otro, las reglas, por existir en forma completamente diferente, no podrían, por lo general, serlo.

Los investigadores de la Red semántica, por el contrario, aceptan que la necesaria versatilidad exige un precio: la aparición de paradojas y de preguntas sin respuesta. Estamos haciendo que el lenguaje correspondiente a las reglas sea todo lo expresivo que se requiera para permitir que la Red razone con la amplitud deseada. Este planteamiento se asemeja al de la Red común: cuando comenzó el desarrollo de la Telaraña, sus detractores señalaron que nunca llegaría a ser una biblioteca bien organizada: falta de una base de datos central y careciendo de la necesaria estructura arborescente, nunca se podría tener la seguridad de encontrar todo cuanto contiene. Les sobraba razón. Pero la potencia expresiva del sistema hizo disponibles vastas cantidades de información, y los motores de búsqueda (que hace un decenio hubieran parecido muy poco prácticos) producen ahora índices notablemente completos de gran parte del material diseminado por ella.

El problema que la Red semántica ha de resolver consiste, pues, en proporcionar un lenguaje capaz de dar expresión tanto a datos como a las reglas para razonar sobre datos, y que permita, además, la exportación a la Red de las reglas de inferencia de cualesquiera sistemas de representación de conocimientos que existan ya.

La tarea que la comunidad de la Red semántica tiene ante sí en este momento consiste en dotar de lógica a la Red, es decir, de medios para usar reglas de inferencia, elegir vías de acción y responder a

Glosario

HTML: Hypertext Markup Language (lenguaje de anotación de hipertexto). Lenguaje utilizado para codificar los formatos, vínculos y demás aspectos de las páginas de la Red. Se vale de marcas ("tags") normalizadas como <H1> y <BODY> cuyo significado e interpretación se halla establecida con carácter universal por el World Wide Web Consortium.
XML: eXtensible Markup Language (lenguaje ampliable de anotación). Es, como el HTML, un lenguaje de anotación, pero permite a todo usuario definir sus propias marcas. El XML no dispone de mecanismos propios que hagan saber a los demás usuarios los significados de las nuevas anotaciones que un usuario pueda crear.
RECURSO: voz de argot para designar cualquier ente. Entre ellos, páginas, dispositivos, personas y otros.
URL: Universal Resource Locator (localizador universal de recursos). Códigos familiares (como http://www.investigacionyciencia.es/index.html) que se utilizan en los hipervínculos.
URI: Universal Resource Identifier. Los URL son los tipos de URI más habituales. Un URI define o especifica un ente, sin aludir forzosamente a su ubicación en la Red.
RDF: Resource Description Framework (descriptor de recursos). Un método para definir información en la Red. El RDF proporciona la técnica para expresar el significado de términos y conceptos en una forma que los ordenadores puedan procesar rápidamente. RDF puede utilizar XML en su sintaxis y los URI para especificar entes, conceptos, propiedades y relaciones.
ONTOLOGIAS: Colecciones de enunciados redactados en un lenguaje, como el RDF, que define las relaciones entre conceptos y especifica reglas lógicas para razonar con ellos. Los ordenadores "comprenderán" el significado de los datos semánticos de una página de la Red siguiendo vínculos con ontologías especificadas.
AGENTE: Un programa que opera sin necesidad de control humano directo ni de supervisión constante, con el fin de alcanzar metas fijadas por el usuario.
BUSQUEDA DE SERVICIOS: El proceso de localización de un agente o de un servicio automático de la Red que realice una función requerida. La semántica facultará a los agentes para describir unos a otros la función exacta que realizan, y qué datos han de recibir para ello.

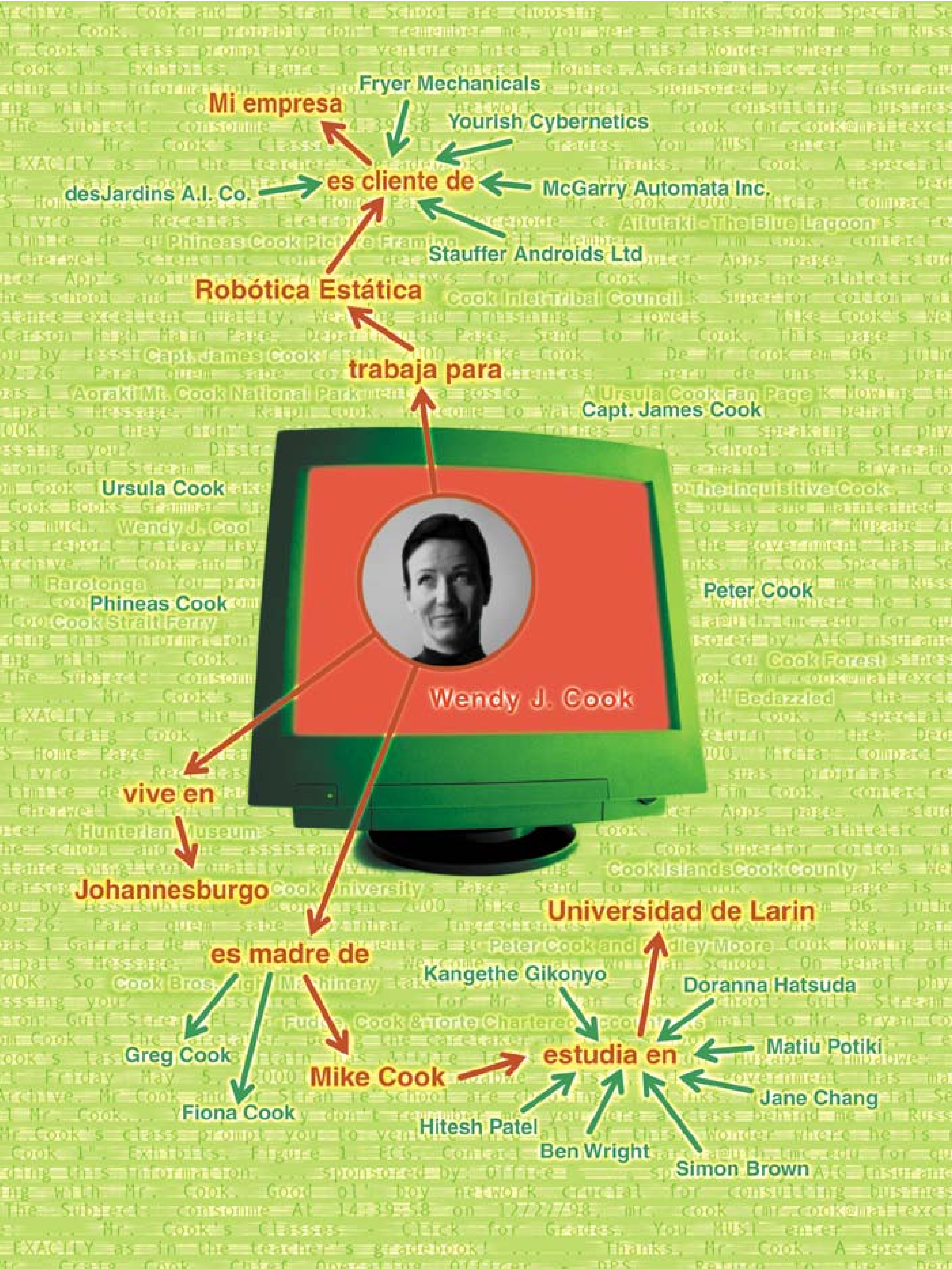
preguntas. La tarea se ve complicada por una conjunción de decisiones, de tipo matemático unas, de tipo técnico otras. La lógica ha de tener potencia suficiente para describir propiedades complejas de objetos, pero no tanta que permita proponer a los agentes paradojas que les dejen bloqueados. Felizmente, la mayor parte de la información que deseamos expresar es del tipo "un perno de cabeza hexagonal es un tipo de perno que se usa en máquinas", que se redacta sin dificultad en lenguajes existentes añadiendo un poco de vocabulario extra.

Ya están disponibles dos importantes técnicas para el desarrollo de la Red semántica: la llamada XML (*eXtensible Markup Language*, lenguaje ampliable de anotación) y la RDF (*Resource Description Framework*, un descriptor de recursos). El lenguaje XML permite a todos crear etiquetas propias, es decir, marcas o anotaciones no visibles ("tags"), como <código postal> o <universidad>, que agregan anotaciones a páginas de la Red o a secciones de texto contenido en la página. Los guiones ("scripts"), unos programas especiales, pueden servirse de estas etiquetas de formas muy elaboradas, pero el redactor de los guiones ha de saber con qué fin utiliza las marcas el autor de la página. En breve, el lenguaje XML permite a los usuarios añadir a sus documentos estructura arbitraria, pero nada dice sobre lo que significan tales estructuras.

La significación se expresa mediante el descriptor RDF, que la codifica en conjuntos de ternas. Los elementos de cada terna vienen a ser como el sujeto, el verbo y el predicado de una oración elemental. Estas ternas pueden escribirse usando marcas XML. En el descriptor RDF, los documentos contienen asertos que declaran que objetos particulares (personas, páginas de la Red o lo que sea) tienen propiedades ("es hermana de", "es autor de") con ciertos valores (otra persona, otra página de la Red). Resulta que esta estructura proporciona una vía natural para describir la vasta mayoría de los datos procesados mediante máquinas. El sujeto y el objeto quedan identificados mediante un URI (identificador universal de recursos), como los utilizados en los vínculos de las páginas de la Red. (Los URL —sigla de *Universal Resource Locators*— son los URI de tipo más utilizado.) También los verbos quedan identificados mediante URI, lo cual permite a todos definir conceptos o verbos nuevos sin más que definir el URI correspondiente en algún lugar de la Red.

El lenguaje humano se enriquece al utilizar un mismo término para aludir a entes distintos. En automatización ocurre lo contrario. Imaginemos que contrato un servicio de payasos mensajeros con el fin de que feliciten el cumpleaños a mis clientes llevándoles globos a domicilio. Desafortunadamente, el servicio transfiere las direcciones de mis clientes desde mi base de datos a la suya, sin saber que las "direcciones" de la mía corresponden a direcciones de envío de las facturas, no a domicilios, y que muchas designan apartados de correos. Los payasos que he contratado acaban

2. SERAN POSIBLES BUSQUEDAS AUTOMATICAS acertadas y complejas cuando la Red se encuentre vigorosamente cargada de semántica. En este caso, un programa de búsqueda consigue localizar correctamente a una persona partiendo de informaciones olvidadas a medias: su apellido es "Cook", trabaja para una compañía que consta en nuestra lista de clientes y tiene un hijo que asiste, como hicimos nosotros, a la Universidad de Larin. La combinación correcta de estos datos no reside en una sola página de la Red; la semántica hará más fácil que un programa discierna entre los elementos de varias páginas, comprenda relaciones como "Mike Cook es hijo de Wendy Cook" y los ensamble con fiabilidad. Con mayor generalidad, la semántica permitirá efectuar automáticamente procesos o transacciones complicadas.


Mi empresa
Fryer Mechanicals
Yourish Cybernetics
es cliente de
desJardins A.I. Co.
McGarry Automata Inc.
Stauffer Androids Ltd
Robótica Estática
trabaja para
Capt. James Cook
Ursula Cook
Peter Cook
Phineas Cook
Wendy J. Cook
vive en
Johannesburgo
es madre de
Greg Cook
Fiona Cook
Mike Cook
estudia en
Universidad de Larin
Kangethe Gikonyo
Doranna Hatsuda
Matiu Potiki
Jane Chang
Hitesh Patel
Ben Wright
Simon Brown

divirtiendo a cierto número de funcionarios de correos, lo que puede no estar mal, pero no es el fin deseado. Este problema se resuelve utilizando un URI distinto para cada concepto concreto. Una dirección postal puede distinguirse así de una dirección domiciliaria, y ambas de la dirección de una entidad cualquiera.

Las ternas del descriptor de recursos RDF forman mallas de información sobre entes relacionados. Dado que RDF utiliza XML para codificar la información en los documentos, los URI garantizan que los conceptos no sean meras palabras de un documento, sino que están vinculados a una definición unívoca que todo el mundo puede encontrar en la Red. Supongamos, por ejemplo, que tenemos acceso a una variedad de bases de datos con información sobre personas, incluida su dirección. Si queremos encontrar personas con un determinado código postal, necesitamos saber en cada base de datos cuáles son los campos que representan nombres, y cuáles, códigos postales. RDF puede especificar que "(el campo 5 de la base de datos A) (es un campo de tipo) (código postal)," utilizando para cada componente URI en lugar de frases.

Ontologías

Desde luego, la historia no termina aquí, porque dos bases de datos pueden utilizar identificadores diferentes para un mismo concepto, por ejemplo, **código postal** y **zip code**. Un programa que se proponga comparar o combinar información tomada de ambas bases de datos ha de estar informado de que estos dos términos se están empleando para designar una misma cosa. Lo ideal sería que el programa tuviera una forma de descubrir estas identidades de significado para cualesquiera bases de datos que se encuentre.

El tercer integrante básico de la Red semántica proporciona una solución a este problema. Está formado por recopilaciones de informaciones, llamadas ontologías. En filosofía, una ontología es una teoría que trata de la naturaleza de la existencia, o del tipo de cosas que existen. Los investigadores de la inteligencia artificial y de la Red se han apropiado del término y lo han incorporado a su jerga; para ellos, una ontología es un archivo o un documento que define formalmente las relaciones entre términos. Las ontologías más típicas para la Red constan de una taxonomía y de un conjunto de reglas de inferencia.

La taxonomía define clases de objetos y relaciones entre ellos. Por ejemplo, una **dirección** puede definirse como un tipo de **localidad**; se puede establecer que los **códigos de ciudad** solamente sean aplicables a **localidades**, y así sucesivamente. Las clases, las subclases y las relaciones entre entidades constituyen un útil muy potente para utilizar la Red. Es posible expresar un gran número de relaciones entre entidades por asignación de propiedades a clases y haciendo que las subclases hereden tales propiedades. Si los **códigos de ciudad** han de ser del tipo **ciudad** y las ciudades tienen, por lo general, sedes en la Red, podemos hablar de la sede de la Red asociada con un **código de ciudad**, aun cuando no haya una base de datos que vincule directamente un código de ciudad a una sede de la Red.

Las reglas de inferencia integradas en ontologías proporcionan una potencia mayor todavía. Una ontología puede expresar la regla "Si un código de ciudad está asociado con un código provincial, y si una dirección menciona ese código de ciudad, entonces esa dirección contiene el código provincial asociado". Un programa podría entonces deducir fácilmente que, por ejemplo, una dirección de la Universidad Pompeu Fabra, por estar en la ciudad de Barcelona, tiene que estar en la provincia de Barcelona, que se halla en España, y que, por consiguiente, ha de tener el formato prescrito por las normas españolas. En realidad, el ordenador no "comprende" nada de esta información, pero ahora sí es capaz de manipular los términos mucho más eficazmente de modo mucho más útil y significativo para usuarios humanos.

Provista la red de páginas de ontología, se columbran soluciones a los problemas terminológicos. El significado de los términos o códigos XML utilizados en una página de la Red puede ser definido mediante punteros que vayan desde la página hasta una ontología. Desde luego, se plantean ahora los mismos problemas que antes si apunto hacia una ontología que defina **direcciones** como datos que contienen un **zip code** y se alude a una que hable de **código postal**. Las confusiones de esta clase admiten resolución por medio de ontologías (u otros servicios de la Red) que proporcionen relaciones de equivalencia: una o ambas de nuestras ontologías pueden contener la información de que el **zip code** al que yo apunto es equivalente al **código postal** que usted utiliza.

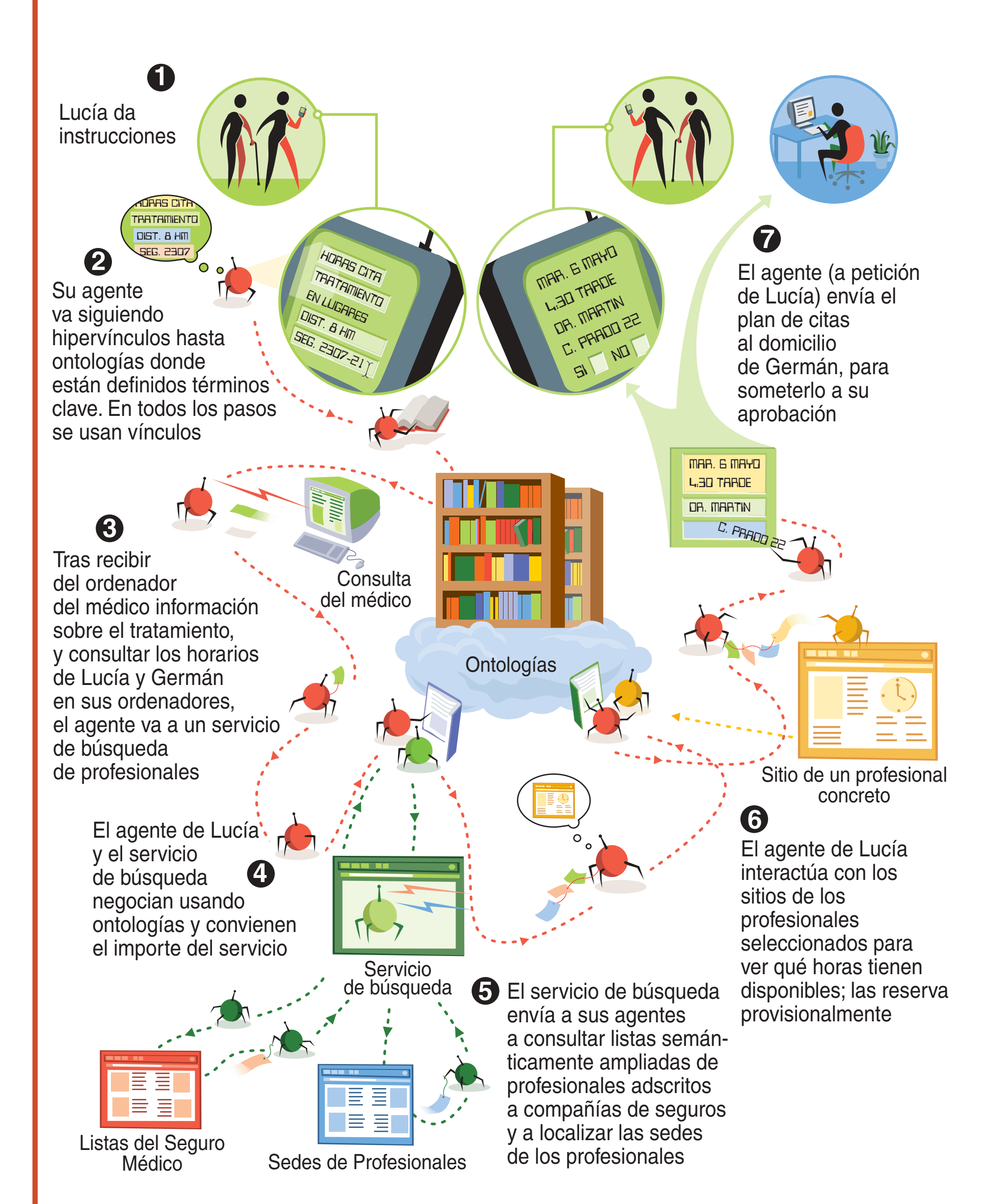
Nuestro plan para que los payasos vayan a entretener a mis clientes queda resuelto en parte cuando las dos bases de datos apunten a distintas definiciones de **dirección**. El programa, valiéndose de URI distintas para las diferentes nociones de **dirección**, no las confundiría; de hecho, tendría que descubrir más adelante que tales conceptos presentan algún tipo de relación. El programa podría entonces utilizar un servicio que tomase una lista de **direcciones** postales (definidas en la primera ontología) y la convirtiese en una lista de **direcciones** domiciliarias (la segunda ontología), reconociendo y suprimiendo las referencias a apartados de correos y demás significados que no vinieran al caso. La estructura y la semántica que las ontologías proporcionan le facilitan a un empresario ofrecer tal servicio y pueden hacer que su uso sea del todo transparente.

Las ontologías pueden ampliar el funcionamiento de la Red de muchas formas. Pueden aplicarse de un modo sencillo para mejorar la precisión de las búsquedas: el programa de búsqueda ciñe su consulta a las páginas que aludan a un concepto exacto, en lugar de presentar todas las obtenidas por medio de palabras clave ambiguas. Aplicaciones más avanzadas podrían utilizar las ontologías para relacionar la información de una página

con las estructuras de conocimiento y las reglas de inferencia asociadas. Hay un ejemplo de página marcada con indicadores aptos a tal fin en http://www.cs.umd.edu/~hendler. Si el lector encamina su navegador a esa página podrá ver una página normal de la Red titulada “Dr. James. A. Hendler.” No tendrá dificultad en localizar un enlace a una breve nota biográfica y leer en ella que Hendler es doctor por la Universidad Brown. Un programa informático, en cambio, tendría que ser de gran complejidad para adivinar que esta información podría encontrarse en una biografía y para comprender el lenguaje natural utilizado en ella.

Pensando en los ordenadores, sin embargo, esta página se halla vinculada a una página ontológica que define información atinente a facultades y departamentos de informática. Por ejemplo, los profesores trabajan en universidades y son, en general, doctores. Un segundo nivel de anotaciones en la página (no visibles por los navegadores típicos de la Red) se vale de conceptos de la ontología para especificar que Hendler se doctoró en la entidad descrita en la URI http://www.brown.edu/, la página de la Red correspondiente a la Universidad Brown. Los ordenadores pueden descubrir también que Hendler es miembro de un determinado proyecto de investigación, que tiene una dirección electrónica y así sucesivamente. Toda esta información es procesable sin dificultad por un ordenador y podría servir para responder a indagaciones (por ejemplo, ¿dónde se doctoró el doctor Hendler?) que normalmente exigirían que una persona fuera revisando el contenido de varias páginas ofrecidas por un motor de búsqueda.

Este marcado, además, facilita mucho el desarrollo de programas capaces de habérselas con preguntas complicadas cuya respuesta no se encuentra en una sola página de la Red. Supongamos que desea usted localizar a una tal señora Cook, que le fue presentada en un congreso profesional del año pasado. Usted no recuerda su nombre de pila, pero sí que trabajaba para uno de sus clientes, y que su hijo era



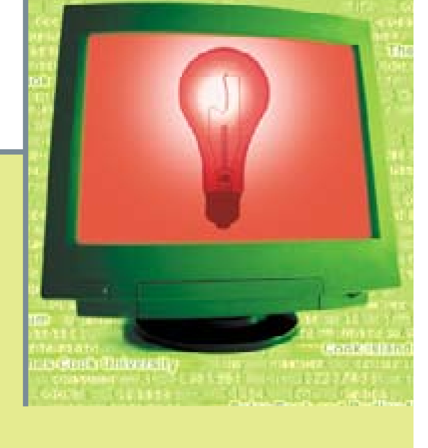
3. LAS TAREAS DE LOS AGENTES informáticos se verán muy facilitadas por los contenidos semánticos de la Red. En este supuesto, el agente de Lucía localiza una clínica de fisioterapia que cumpla una serie de requisitos y cuyo horario de citas encaje con los suyos y los de su hermano Germán. Las ontologías que definen el significado de los datos semánticos desempeñan un papel esencial a la hora de dotar al agente de capacidad para comprender qué hay en la Red semántica, para interactuar con los sitios de ella y para utilizar otros servicios automáticos.

estudiante en la misma universidad donde se formó usted. Un programa de búsqueda inteligente puede ir revisando todas las páginas de personas que se llamen “Cook” (dejando de lado las referentes a otras acepciones inglesas de esta palabra, a las islas Cook, etc.), hallar las que mencionen que esa persona trabaja para una compañía que figure en su lista de clientes, y que siga vínculos a páginas de la Red creadas por sus hijos para localizar si se encuentran estudiando en el lugar correcto.

Agentes

La auténtica potencia de la Red semántica no se hará efectiva hasta que se creen muchos programas que recopilen contenidos de la Red tomados de diversas fuentes, procesen la información e intercambien sus resultados con otros programas. La eficacia de estos agentes informáticos crecerá exponencialmente conforme vayan estando disponibles en la Red más contenidos maquinalmente legibles y más servicios automáticos (en-

La aplicación ‘estrella’



La estrella de una técnica cualquiera es la que lleva a un usuario a interesarse por esa técnica y a empezar a utilizarla. Los aparatos portátiles de radio fueron una aplicación estrella de los transistores, y el teléfono móvil, una de las más importantes de las comunicaciones inalámbricas. En nuestro caso, la Red semántica es precisamente la aplicación estrella. La Telaraña es la aplicación estrella de Internet. La Red semántica es otra aplicación estrella de la misma magnitud.

Nuestra tesis es que las capacidades de la Red semántica son demasiado generales para poder considerarlas como solución de un problema clave o creación de un cierto artilugio. Tendrá aplicaciones que ni siquiera hemos soñado.

Sí podemos, no obstante, prever algunas aplicaciones entusiasmantes (ya que no estelares) que inducirán inicialmente a su uso. Los catálogos electrónicos semánticamente anotados resultarán útiles tanto para los vendedores como para los compradores. A las empresas pequeñas les será más sencillo establecer transacciones seguras de comercio electrónico, y con mayor autonomía. Y un último ejemplo: hacemos reservas para un largo viaje por el extranjero. Las líneas aéreas, los hoteles, los campos de fútbol, etc., al confirmar las reservas, incluyen anotaciones semánticas. Todas las fechas y horas quedan directamente consignadas en nuestra agenda electrónica, y todos los gastos, cargados directamente a nuestro programa de contabilidad, con independencia de los programas semánticamente capacitados que utilicemos. Ya no será necesario el laborioso recorte y pegado desde el correo electrónico. No será necesario que las empresas faciliten los datos en media docena de formatos diferentes, ni de que creen e impongan formatos propios.

tre ellos, otros agentes). La Red semántica promueve esta sinergia: incluso agentes no expresamente diseñados para trabajar en colaboración pueden transferirse datos uno al otro si éstos se hallan provistos de semántica.

Una faceta importante del funcionamiento de los agentes será el intercambio de “demostraciones” redactadas en el lenguaje unificador de la Red semántica (el lenguaje que expresa inferencias lógicas que son resultado de reglas de razonamiento y de información, como las especificadas mediante ontologías). Supongamos, por ejemplo, que un servicio de Internet ha recabado información para contactar con la señora Cook y que, para gran sorpresa nuestra, la sitúa en Johannesburgo. Como es natural, deseamos verificar que tal información sea correcta, así que nuestro ordenador le solicita al servicio que demuestre su respuesta, lo que cumple sin dificultad traduciendo su razonamiento interno al lenguaje unificador de la Red semántica. Un motor de inferencias de nuestra máquina verifica rápidamente que esta señora Cook coincide con la que estábamos buscando, y puede incluso dejarnos ver las correspondientes páginas de la Red si aún tenemos dudas. Aunque distan mucho de poder calar en las profundidades que podría ofrecer la Red semántica, ciertos programas pueden ya intercambiarse demostraciones en la forma descrita, valiéndose de las versiones preliminares del lenguaje unificador.

Las firmas digitales constituirán otra característica esencial. Las firmas digitales son bloques encriptados de datos que los ordenadores y los agentes pueden utilizar para comprobar que la información agregada procede de una fuente identificada y digna de confianza. Nos gustaría, desde luego, estar bien seguros de que un aviso de cargo enviado a nuestro programa de contabilidad por un minorista de la Red no es una falsificación generada por un adolescente vecino nuestro, avezado en ordenadores. Parece obvio que los agentes deberían desconfiar de los asertos que leyeran en la Red semántica si no han verificado las fuentes de información.

Aunque existen ya en la Red muchos servicios automáticos, por carecer de semántica los demás programas y los agentes en particular no tienen forma de localizar uno que realice una tarea específica. Este proceso, la búsqueda de servicios, sólo podrá producirse cuando exista un lenguaje común para describirlos de modo tal que otros agentes puedan “comprender” tanto la función ofrecida como la manera de aprovecharla. Servicios y agentes pueden dar a conocer su función depositando, por ejemplo, sus descripciones en anuarios semejantes a las Páginas Amarillas.

En la actualidad se dispone de unos pocos sistemas de búsqueda de servicios, pero son de bajo nivel, como el *Universal Plug and Play*, de Microsoft, centrado en la conexión de dispositivos de distintos tipos, y el *Jini*, de Sun Microsystems, orientado a la conexión de servicios. Estas iniciativas, sin embargo, abordan la estructura o sintaxis del problema; se basan en la estandarización de un conjunto predeterminado de descripciones de funciones. Pero la estandarización no puede ir demasiado lejos, pues no hay forma de prever todas las necesidades futuras.

La Red semántica es, por el contrario, más flexible. Los agentes productor y consumidor pueden llegar a entenderse mediante el intercambio de ontologías, que proporcionan el vocabulario requerido para “dialogar”. Los agentes podrían incluso crear por sí mismos nuevas capacidades de razonamiento cuando descubrieran nuevas ontologías. Con semántica también resulta más fácil sacar partido de un servicio que sólo atiende en parte a una petición.

Un proceso típico entrañaría la creación de una “cadena de valores” donde se van transfiriendo subensamblajes de información de un agente a otro, cada uno de los cuales “añade un valor”, tratando de construir el producto definitivo solicitado por el usuario final. No nos

engañemos: para crear automáticamente sobre pedido cadenas de valor complejas, algunos agentes se valdrán no sólo de la Red semántica, sino también de técnicas de inteligencia artificial. Pero la Red semántica proporcionará los cimientos y la estructura necesarias para hacer más realizables tales técnicas.

El resultado de armonizar todas estas propiedades son las capacidades exhibidas por los agentes de Lucía y Germán en el supuesto con que empezó este artículo. Sus agentes habrían ido delegando la tarea, fragmentada, a otros servicios y agentes descubiertos por medio de anuncios de servicios. Podrían, por ejemplo, haber utilizado un **servicio de confianza** para tomar una lista de **profesionales** y averiguar cuáles están **inscritos** en un determinado **seguro médico** y realizan un determinado **tratamiento**. La lista de profesionales podría haber sido suministrada por otro servicio de búsqueda, etc. Estas actividades forman cadenas en las que una ingente cantidad de datos dispersos por la Red (y casi inútiles en esa forma) se van progresivamente reduciendo a una pequeña cantidad de datos de gran valor para Lucía y Germán: un calendario de citas y consultas que se ajustaba a sus horarios y a otros requisitos.

En la siguiente etapa, la Red semántica desbordará el mundo virtual y se extenderá hasta nuestro mundo físico. Las URI pueden apuntar a cualquier cosa, sin exceptuar a las entidades materiales. Significa esto que podemos servirnos del lenguaje RDF para describir objetos, como teléfonos móviles o aparatos de televisión. Tales equipos pueden anunciar, al estilo de los agentes informáticos, las funciones que pueden realizar y el modo en que pueden ser controlados. Por ser mucho más flexible que los sistemas de bajo nivel, como el *Universal Plug and Play*, esta metodología semántica abre un abanico de posibilidades apasionantes.

Por ejemplo, lograr lo que hoy se denomina automatización del hogar exige una minuciosa configuración de los aparatos domésticos, para que puedan operar en conjunción. La descripción semántica de las funciones y capacidades de tales aparatos permitirá lograr dicha automatización con intervención humana mínima. Tenemos un ejemplo trivial cuando Germán responde al teléfono y baja el volumen del equipo musical. En lugar de tener que programar cada aparato concreto, Germán podría programar tal función de una vez por todas para cubrir cada **dispositivo local** que advirtiese que posee **mando de volumen**, como la TV, el DVD o incluso los reproductores de multimedios del ordenador portátil.

Ya se han dado los primeros pasos en esta dirección. Se ha trabajado en el desarrollo de una norma para la descripción de las capacidades funcionales de los equipos (por ejemplo, los tamaños de pantalla) y las preferencias del usuario. Este estándar, construido sobre el RDF, ha sido llamado CC/PP (*Composite Capability/Preference Profile*). En un principio, permitirá que los teléfonos móviles y otros clientes no estándar de la Red describan sus características de modo que el contenido de la Red pueda ajustarse para ellos sobre la marcha. Más adelante, cuando se añada la plena versatilidad de los lenguajes de manipulación de ontologías y de lógica, los dispositivos podrían buscar y emplear automáticamente servicios u otros dispositivos, aumentando su versatilidad o información. No resulta imposible imaginar que nuestro horno de microondas, acoplado a la Red, consultase al fabricante de alimentos congelados para optimizar los parámetros de cocción.

Evolución del conocimiento

La Red semántica no es un mero útil para la realización de tareas individuales como las que hemos estado comentando hasta ahora. Si acertamos en su creación, habrá de contribuir a la evolución del conocimiento humano.

La iniciativa humana está atrapada en una tensión eterna entre la eficacia de pequeños grupos que actúan con independencia y el imperativo de integración en la gran comunidad. Un grupo pequeño es capaz de innovación rápida y eficiente, pero al hacerlo produce una subcultura cuyos conceptos no son comprendidos por otros. La coordinación de acciones en un grupo extenso, de una lentitud exasperante, requiere una inmensa cantidad de comunicación. El mundo funciona en el espectro que va de uno a otro extremo, con tendencia a empezar en lo pequeño —a arrancar de la idea de un individuo— para ir avanzando con el tiempo hacia una comprensión más amplia.

Uno de los procesos esenciales consiste en el ensamblaje de subculturas cuando se precisa un lenguaje común. Es frecuente que dos grupos desarrollen por separado conceptos muy parecidos; la descripción de la relación entre ellos reporta grandes beneficios. De la misma forma que un diccionario bilingüe, o que una tabla de conversión de pesos y medidas, las relaciones permiten la comunicación y la cooperación incluso cuando la unidad de concepto no ha llevado (todavía) a una unidad terminológica.

La Red semántica, al denominar de forma sencilla cada concepto mediante una URI, permite a todos expresar los nuevos conceptos que inventen. Su lenguaje unificador lógico posibilitará que estos conceptos vayan progresivamente quedando imbricados en una Red universal. Gracias a esta estructura, los conocimientos y el funcionamiento de la humanidad se someterán al análisis de agentes informáticos; éstos proporcionarán una nueva clase de útiles mediante los cuales podremos vivir, trabajar y aprender conjuntamente.

Bibliografía complementaria

WEAVING THE WEB: THE ORIGINAL DESIGN AND ULTIMATE DESTINY OF THE WORLD WIDE WEB BY ITS INVENTOR. Tim Berners-Lee, con Mark Fischetti. Harper San Francisco, 1999.

World Wide Web Consortium (W3C): www.w3.org/

Actividad sobre la Red Semántica en W3C: www.w3.org/2001/sw/

DARPA Agent Markup Language (DAML. Página en la Red: www.daml.org/



El Rorschach y otros tests proyectivos

Los psicólogos recurren al test de manchas de tinta ideado por Rorschach y a otras pruebas afines para evaluar la personalidad y los trastornos mentales. La investigación pone en cuestión la validez general de dichos métodos

Scott O. Lilienfeld, James M. Wood y Howard N. Garb

¿Y si le pidiesen al lector que describiera las imágenes que estuviese viendo en una mancha de tinta o que inventara una historia basándose en una ilustración ambigua, por ejemplo en la de un hombre de mediana edad que aparta su mirada de una mujer que le iba a tomar del brazo? Para acceder a lo pedido, tendría que recurrir a sus propias emociones, experiencias, recuerdos e imaginación. En suma, se proyectaría él mismo en las imágenes observadas. Una vez hecho esto, muchos psicólogos aseguran que podrían interpretar las expresiones del lector y extraer conclusiones sobre los rasgos de su personalidad, sus necesidades inconscientes y, en resumidas cuentas, sobre su salud mental.



EL TEST DE RORSCHACH

¿Mero borrón?

"Parecen dos dinosaurios con cabeza enorme y cuerpo pequeño. Y como que estuvieran separándose el uno del otro y mirando hacia atrás. La manchita negra del centro me sugiere una nave espacial."

Considerado antaño una "radiografía de la mente", el test de las manchas de tinta ideado por Rorschach sigue siendo la más famosa —y denostada— prueba proyectiva. El psicólogo pone en manos del sujeto un mazo de 10 láminas con manchas simétricas de tinta, presentándoselas una por una y en un orden determinado, para que diga qué le parece o qué ve en cada una. Cinco manchas contienen algún color; cinco son negras y grises. Los sujetos de la prueba pueden hacer girar las imágenes. La de aquí arriba es una versión invertida de una efectuada por Andy Warhol; las manchas del Rorschach auténtico no se pueden publicar.

Se presupone que las respuestas a las manchas revelan aspectos de la personalidad y de la salud mental del sujeto. Los defensores de tal presunción creen, por ejemplo, que las referencias a animales en movimiento —como a los dinosaurios arriba mentados— indican a menudo impulsividad, mientras que las alusiones a la 'negrura' de una mancha —como en la de la nave espacial— suelen indicar depresión.

Es probable que la idea de mostrar manchas de tinta se la inspirase al psiquiatra suizo Hermann Rorschach un juego de salón. El test empezó a utilizarse en 1921 y por 1945 estaba muy bien considerado; pero en los años cincuenta su prestigio comenzó a declinar, porque la investigación descubrió que los psicólogos interpretaban de modo diferente las mismas respuestas y que muchas de éstas no guardaban ninguna correlación estricta con determinados trastornos mentales ni con rasgos de la personalidad.

Pero, ¿hasta qué punto serían acertadas esas conclusiones? No se trata de una cuestión baladí. A menudo los psicólogos aplican tales métodos "proyectivos" (presentando imágenes, palabras u objetos ambiguos) como elementos de evaluaciones mentales y los resultados pueden afectar profundamente a las vidas de los sometidos a las pruebas. Estas se emplean, con frecuencia, para diagnosticar enfermedad mental, para predecir si los convictos volverán o no a delinquir cuando se les dé libertad condicional, para evaluar la estabilidad mental de padres que se pelean por la custodia legal de sus hijos y para discernir si los niños han sufrido abusos sexuales.

Los autores han revisado un gran número de investigaciones acerca de la fiabilidad y la eficacia de los métodos proyectivos, concentradas sobre tres de las pruebas más difundidas y mejor estudiadas.

Los autores

SCOTT O. LILIENFELD, JAMES M. WOOD y HOWARD N. GARB son especialistas en métodos y pruebas de evaluación psicológica. Han colaborado en una reciente encuesta sobre la validez científica de los métodos proyectivos publicada por la Sociedad Americana de Psicología. Lilienfeld y Wood son profesores de la Universidad de Emory y de la Universidad de Texas en El Paso, respectivamente; Garb enseña en la de Pittsburgh.

¿Mariposas o bisontes?

El famoso test de Rorschach de las manchas de tinta —que pide a los sujetos que describan lo que ven en una serie de 10 manchas— es con mucho el más extendido de los métodos proyectivos. Se aplica, cada año, a centenares de miles o quizás a millones de personas. Nuestra investigación se refiere a la versión moderna, rehabilitada, no a la construcción original del test introducida en los años veinte del siglo XX por el psiquiatra suizo Hermann Rorschach.

La prueba inicial fue objeto de severas críticas en los años cincuenta y sesenta, en parte porque carecía de procedimientos estandarizados y de un conjunto de normas (resultados promediales del total de la población). La estandarización es importante, pues lo que podrían parecer diferencias triviales en el desarrollo de una prueba influye en las respuestas dadas. Las normas codificadas proporcionan un punto de referencia para determinar cuándo las respuestas se salen del intervalo de lo aceptable.

Por los años setenta, John E. Exner, Jr., corrigió manifiestamente los problemas que había en el test original de Rorschach introduciendo el Sistema Comprensivo. Consistía éste en una serie de instrucciones que establecían reglas minuciosas sobre cómo proponer el test de las manchas de tinta y cómo interpretar las respuestas; daba también normas según se tratara de niños o de adultos.

Pese a la popularidad del Sistema Comprensivo, en líneas generales se queda corto respecto a dos criterios cruciales que también resultaban problemáticos para el Rorschach original: la fiabilidad y la validez de la medición. Una prueba paramétricamente fiable da resultados similares con independencia de quien califique y tabule las respuestas. Una técnica válida mide aquello que trata de medir: sus resultados concuerdan con los producidos por otros métodos fidedignos, predicen un comportamiento o ambas cosas.

Ayudará a entender los defectos del Rorschach en cuanto a fiabilidad de la medición el saber cómo se interpretan las reacciones a sus manchas de tinta. Primero, el psicólogo clasifica las reacciones recogidas distribuyéndolas en más de 100 características o variables. El evaluador, por ejemplo, registra si la persona se fue fijando en las manchas enteras o sólo en partes de ellas, anota si las imágenes detectadas fueron inusuales o fueron las típicas de la mayoría de los

sometidos a la prueba, y apunta qué aspectos de las manchas de tinta (forma o color) fueron los más determinantes de la respuesta expresada.

A continuación, el examinador compila esos datos y traza un perfil psicológico del individuo en cuestión. Como parte del proceso interpretativo, los psicólogos podrían concluir que el fijar la atención en detalles menores (por ejemplo, en salpicaduras aisladas) de las manchas, en vez de fijarse en las imágenes enteras, es indicio de tendencias obsesivas en el sujeto, y que el ver cosas en los espacios en blanco entre las manchas mayores, en vez de verlas en las superficies tintadas, revela un fondo de negativa contrariedad.

Para que la puntuación de una variable se considerase muy de fiar, dos evaluadores distintos deberían anotar similares calificaciones al examinar las respuestas de cualquier persona. Sin embargo, la investigación reciente demuestra que sólo se logra un alto grado de acuerdo para la mitad aproximada de las características examinadas por los que puntúan las respuestas al Rorschach; para las restantes variables, los evaluadores podrían ofrecer calificaciones muy dispares.

No menos preocupante resulta saber que los análisis de la validez del Rorschach revelan su escasa capacidad para descubrir la mayoría de los trastornos psiquiátricos, si exceptuamos la esquizofrenia y otros desequilibrios caracterizados por desórdenes del pensamiento, tales como el trastorno bipolar (psicosis maniacodepresiva). Pese a las pretensiones de algunos abogados del Rorschach, este método no detecta, de una

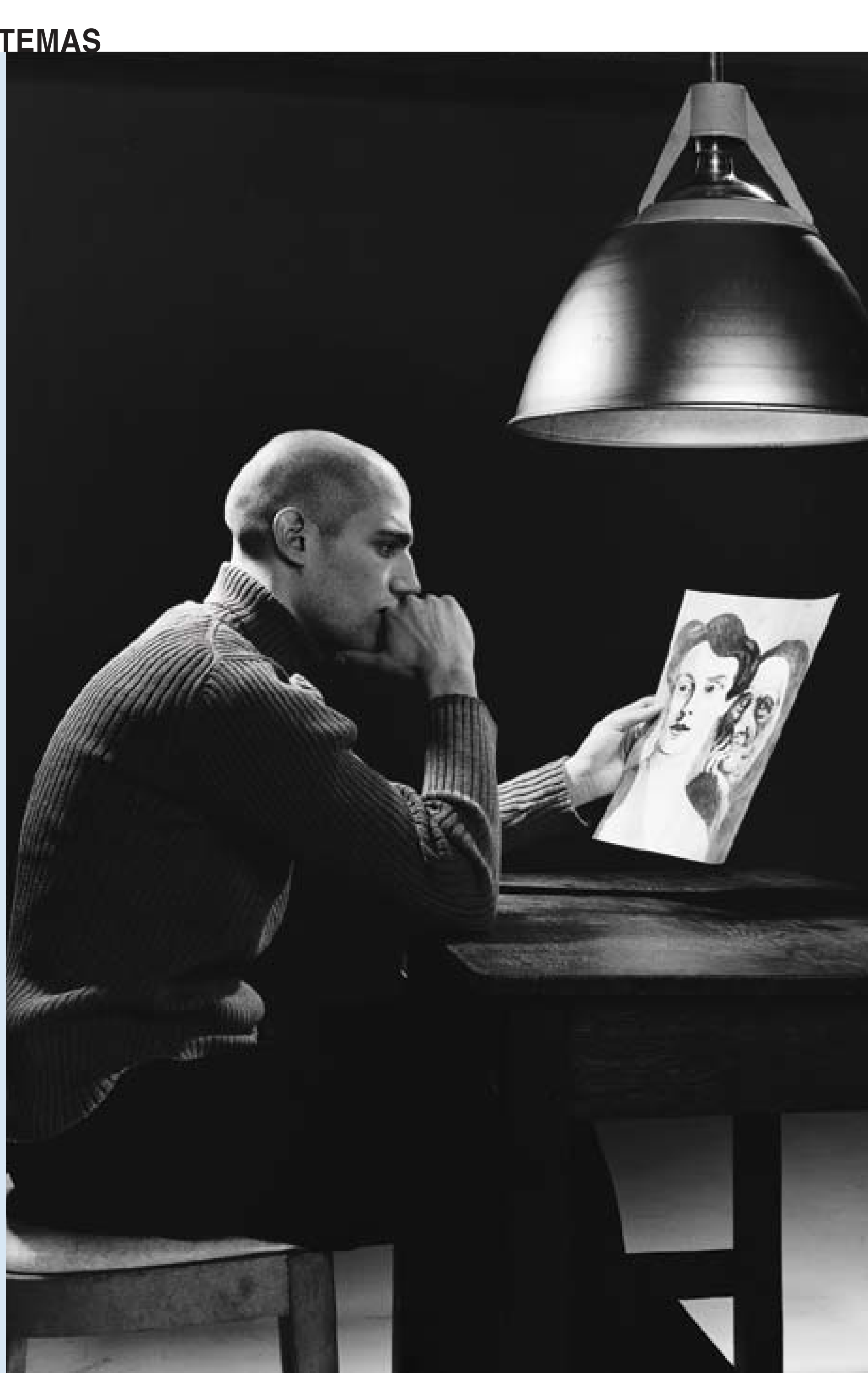
EL TEST DE APERCEPCION DE TEMAS

Imágenes imperfectas

El Test de Apercepción de Temas (TAT), creado en los años treinta por Henry A. Murray y su discípula Christiana Morgan, en la Universidad de Harvard, es una de las pruebas proyectivas más utilizadas. Los psicólogos van presentando a los sujetos unas cuantas láminas (de 5 a 12) de un mazo de 31 en las que hay imágenes de situaciones ambiguas, la mayoría de ellas de seres humanos. Los sujetos han de construir una historia en torno a cada lámina, describiendo los sucesos que allí ven, qué llevó hasta los mismos, qué piensan y sienten los personajes y qué irá a pasarles luego. Hay en uso numerosas variantes del TAT, tales como el Test de Apercepción Infantil, que presenta animales en situaciones de ambigua interacción, y el Test de Blacky, que muestra las aventuras de un perro negro y su familia.

Los psicólogos interpretan de diversos modos las respuestas al TAT. Un enfoque prometedor —desarrollado por Drew Westen, de la Universidad de Boston— cuenta con un sistema de puntuación específico para evaluar cómo perciben unas personas a las otras (las "relaciones objetivas"). Según este enfoque, si alguien respondiese a la imagen visible en la fotografía de la derecha hilvanando una historia en la que una vieja induce a una joven a sospechar o a conspirar, tal cuento significaría que el sujeto tiende a ver malevolencia en los otros... pero esto sólo si temas similares volviesen a aparecer en los cuentos que refiriera al serle presentadas otras láminas.

Hay, empero, estudios que muestran que la mayoría de quienes aplican este test no usan sistemas de puntuación específicos para interpretar las historias del TAT, sino que confían en sus propias intuiciones. Tales interpretaciones "impresionistas" del TAT son de muy dudosa validez y muchas de ellas convierten el TAT en mero divertimiento proyectivo tanto para el psicólogo como para el sujeto.



OTRAS PRUEBAS PROYECTIVAS

¿Qué calificación merecen?

Los psicólogos pueden elegir entre docenas de métodos proyectivos, además del Test de Rorschach, el TAT y los de dibujo de figuras. Aunque algunos resisten bien el escrutinio de la investigación, no así la mayoría.

Test de las manos

Los sujetos han de decir qué pueden estar haciendo unas manos representadas en diversas posiciones. Se recurre a esta prueba para tabular la agresividad, la ansiedad y otros rasgos de la personalidad. No se ha estudiado con detenimiento.

Análisis grafológico

Los intérpretes se basan en que determinados 'signos' de la escritura manual reflejan rasgos de la personalidad. Aunque poco eficaz, este método sigue utilizándose todavía para la orientación profesional y la selección de empleados.

Test de colores de Lüscher

El sujeto ha de poner en el orden que prefiera unas fichas de colores, con lo que revelará rasgos de su personalidad. La mayoría de los estudios conceden poco crédito a esta prueba.

Jugar con muñecos anatómicamente completos

Según la investigación, los pequeños que han sufrido abusos sexuales tienden a jugar con los genitales de los muñecos. Pero esta conducta no sirve para la diagnosis, porque muchos menores que no han sufrido abusos hacen lo mismo.

Imágenes de Rosenzweig para el estudio de la frustración

Se pide al sujeto que imagine la reacción de uno de los personajes figurados ante la provocación del otro. Sirve para predecir con éxito la agresividad en los niños.

Test de completar frases

Los sujetos han de completar frases por el estilo de ésta: "Ojalá pudiera yo...". La mayoría de las versiones han sido poco estudiadas, pero una preparada por Jane Loevinger, de la Universidad de Washington, es válida para medir aspectos del desarrollo del ego tales como la moralidad y la empatía.

Test de Szondi

Entre unas fotografías de pacientes afectados de diversos trastornos psíquicos, los sujetos han de seleccionar las que les gusten más y las que menos. Se da por sentado en esta prueba que las selecciones revelan algo acerca de las necesidades del que las hace, pero la investigación ha desacreditado tal supuesto.

forma consistente, la depresión, los trastornos de ansiedad ni la personalidad psicopática (condición que se caracteriza por la falta de honradez, la insensibilidad y el nunca creerse culpable).

Además, aunque los psicólogos aplican frecuentemente el Rorschach para descubrir tendencias violentas, impulsivas y criminales, las investigaciones sugieren, en su mayoría, que tampoco sirve para estos propósitos. Ni hay motivo sólido que abone su empleo para detectar la pedofilia.

Han ido emergiendo nuevos problemas. Algunos datos sugieren que las normas del Rorschach destinadas a distinguir entre la salud y la enfermedad mentales son poco representativas de la población y yerran al reputar inadaptados muchos adultos y niños. En un estudio realizado en 1999 en un banco californiano de donantes de sangre, uno de cada seis de 123 adultos voluntarios tuvo evaluaciones supuestamente indicativas de esquizofrenia.

El error se incrementa a propósito de las minorías. Varios trabajos han demostrado que las evaluaciones hechas para afroamericanos, indios norteamericanos, naturales de Alaska, hispanos y centro y sudamericanos difieren notoriamente de las normales. En conjunto, la investigación suscita serias dudas sobre el uso de las manchas de tinta de Rorschach en psicoterapia y en peritajes judiciales.

Dudas sobre el TAT

Otra prueba proyectiva, el Test de Apercepción de Temas (TAT), puede ser tan problemática como el Rorschach. Exige ese test que los sujetos narren una historia a partir de escenas ambiguas representadas en dibujos o láminas. Entre las 31 láminas de que disponen los psicólogos hay una en la que un muchacho contempla un violín, otra en la que una mujer enloquecida se agarra a una puerta, y otra en la que se ve al hombre y la mujer mencionados al comienzo de este artículo. Para colmo de la ambigüedad, hay una lámina absolutamente en blanco.

Al TAT se le ha llamado "delicia del psicólogo y pesadilla del estadístico". Su desarrollo no suele ajustarse a ningún estándar: según el psicólogo presentará tantas o cuantas láminas, éstas o aquéllas. Añádase que las historias redactadas por los sujetos las interpretan la mayoría de los psicólogos intuitivamente, en vez de seguir un procedimiento de puntuación consolidado. En una encuesta reciente a un centenar de psicólogos ejercientes en ámbitos juveniles y familiares se descubrió que, al aplicar el TAT, sólo el 3 % contaban con un sistema de puntuación estandarizado. Y se sabe que los psicólogos que interpretan el TAT intuitivamente tienden a exagerar en los diagnósticos de trastornos psíquicos.

Dispone el TAT de numerosos sistemas de puntuación estandarizados, pero algunos de los más populares resultan poco fiables en cuanto a la verificación de las pruebas: las calificaciones que se dan de una sesión de test no guardan coherencia con las que se dan de la sesión siguiente. Y su validez también es con frecuencia cuestionable; los estudios que hallan resultados positivos quedan, a menudo, en entredicho por otras investigaciones. Se ha comprobado que varios sistemas de calificación son incapaces de distinguir entre los individuos normales y los psicóticos o los depresivos.

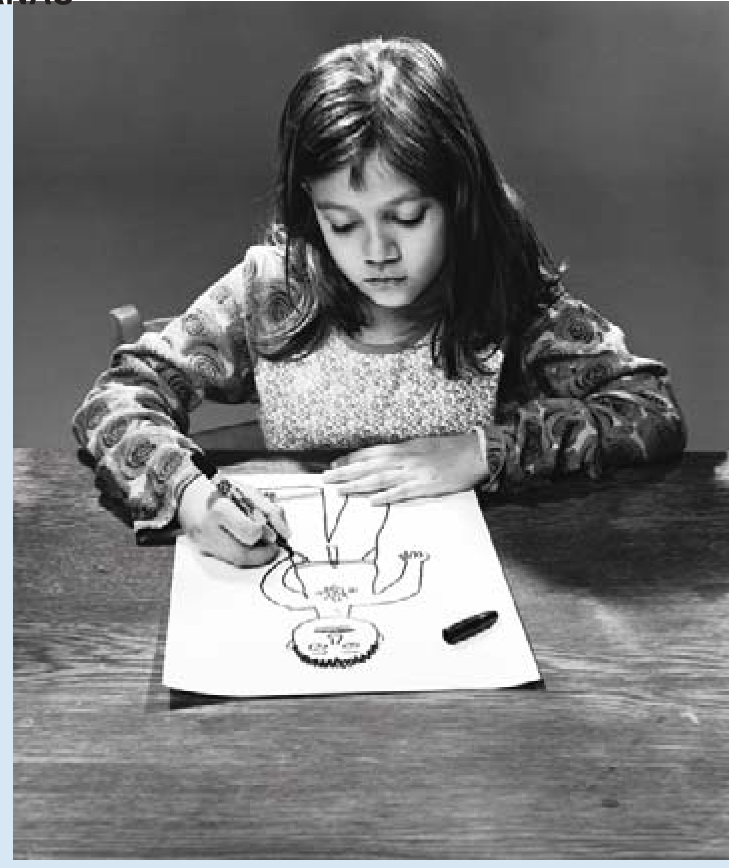
De unos pocos sistemas de evaluación estandarizados para el TAT sí puede admitirse su capacidad para discernir ciertos aspectos de la personalidad, en particular la necesidad de conseguir algo y la manera en que una persona percibe a las otras (las llamadas "relaciones objetivas"). Pero no es raro que los individuos que muestran una fuerte necesidad de lograr fines no puntúen bien en las mediciones del logro efectivo, por lo que puede que sea limitada la capacidad de esta variable para predecir el comportamiento de una persona. A estos sistemas de evaluación suelen faltarles normas codificadas; no han alcanzado madurez suficiente para su aplicación fuera de los marcos de la investigación, aunque merecen que se los siga estudiando.

Faltas en las figuras

A diferencia del Rorschach y del TAT, que provocan reacciones de los sujetos ante imágenes ofrecidas, una tercera prueba proyectiva demanda que dibujen ellos las imágenes. En una versión, así el Test de Dibujar una Persona, se ha de esbozar un ser humano; en otras, se trata de dibujar casas o árboles. Los psicólogos interpretan los dibujos a través de relaciones entre determinados "signos" —rasgos del cuerpo o del vestido— y aspectos de la personalidad o especiales trastornos psíquicos. Podrían asociar unos ojos grandes a paranoia, nudos de corbata anchos a agresión sexual, falta de rasgos faciales a depresión, y así por demás.

LOS DIBUJOS DE FIGURAS HUMANAS

Signos equivocantes



Los psicólogos disponen de muchas pruebas proyectivas basadas en el dibujar. De todas, la más popular es el Test de Dibujar una Persona, sobre todo para calificar a niños y adolescentes. El psicólogo pide al pequeño que dibuje una persona de su mismo sexo y después otra del sexo opuesto, y que lo haga a su aire. (En una variante se pide a los pequeños que dibujen una persona, una casa y un árbol.) Los que aplican este test creen que los dibujos así obtenidos proporcionan datos importantes sobre la personalidad o la salud mental del niño.

En la representación de un hombre, por ejemplo, unos pies pequeños indicarían supuestamente inseguridad o inestabilidad, y una cabeza pequeña, inadaptación. Las manos o los dientes grandes pasarían por ser signos de agresividad; los brazos cortos, signo de timidez. Y rasgos femeninos —largas pestañas o labios oscuros— sugerirían presuntamente confusión respecto a las funciones del sexo.

Sin embargo, todas las investigaciones coinciden en demostrar que esos supuestos 'signos' no guardan relación alguna con la personalidad ni con la salud mental. Los científicos han denunciado tales interpretaciones semióticas tachándolas de "frenología para el siglo XX", en alusión a la decimonónica pseudociencia que infería las personalidades de la gente a partir de las protuberancias del cráneo.

No obstante, el método semiótico sigue siendo muy utilizado. Psicólogos hay que hasta pretenden identificar el abuso sexual fijándose en ciertos signos clave. Por ejemplo, en el dibujo que está haciendo la niña de arriba, entre los presuntos signos de abuso se incluirían el que la persona representada sea de más edad que la niña, el que tenga medio cuerpo sin vestir, una mano cerca de los genitales, una mano metida en un bolsillo, nariz grande y bigote... En realidad, la conexión entre estos 'signos' y el abuso sexual es, cuando menos, dudosa.

Encuesta sobre popularidad y frecuencia de uso de las pruebas psicológicas

En 1995 cierta encuesta preguntó a 412 profesionales, elegidos al azar y pertenecientes a la Asociación Americana de Psicología, con qué frecuencia recurrían a pruebas de medición, proyectivas y no proyectivas; entre ellas, las abajo enlistadas. Los métodos proyectivos presentan a los sujetos imágenes, palabras o cosas ambiguas; los otros les dejan menos libertad de respuesta. El número de psicólogos que se valen de pruebas proyectivas podría haber disminuido algo desde 1995, pero estas técnicas siguen siendo muy socorridas.

TECNICAS PROYECTIVAS	LAS USAN SIEMPRE O FRECUENTEMENTE	LAS USAN AL MENOS EN ALGUNAS OCASIONES
Rorschach	43 %	82 %
Dibujar una figura humana	39 %	80 %
Test de Apercepción de Temas (TAT)	34 %	82 %
Test de completar frases	34 %	84 %
CAT (versión infantil del TAT)	6 %	42 %

TECNICAS NO PROYECTIVAS*	LAS USAN SIEMPRE O FRECUENTEMENTE	LAS USAN AL MENOS EN ALGUNAS OCASIONES
Escala Wechsler de Inteligencia en Adultos (WAIS)	59 %	93 %
Inventario Multifásico de la Personalidad, Minnesota -2 (MMPI-2)	58 %	85 %
Escala Wechsler de Inteligencia en Niños (WISC)	42 %	69 %
Inventario Beck de la Depresión	21 %	71 %

*Los tests no proyectivos que figuran en esta lista son los más empleados para medir el CI adulto (WAIS), la personalidad (MMPI-2), el CI infantil (WISC) y la depresión (Inventario Beck).

FUENTE: “Contemporary Practice of Psychological Assessment by Clinical Psychologists”, por C. E. Watkins *et alii*, en *Professional Psychology: Research and Practice*, vol. 26, n.º 1, págs. 54-60; 1995.

Lo mismo que los otros métodos, la investigación fundada en los tests de dibujos despierta serias preocupaciones. En algunos estudios concuerdan bastante las notas dadas por distintos evaluadores, pero en otros el acuerdo es escaso. Peor aún, ninguna prueba sólida respalda la validez del enfoque sígnico en la interpretación; en otras palabras, no parece que los psicólogos puedan basarse en nada para vincular determinados signos a particulares rasgos de la personalidad o a diagnosis psiquiátricas. Ni hay pruebas sólidas de que los signos que se supone vinculados al abuso sexual sufrido por niños (lenguas o genitales) revelen en realidad una historia de pedofilia. El único resultado positivo repetidamente obtenido es que, en cuanto grupo, las personas que dibujan figuras humanas con omisiones o deformaciones tienen tasas un tanto elevadas de trastornos psíquicos. Por el contrario, hay estudios donde se muestra que los psicólogos tienden a atribuir patologías mentales a muchos individuos normales que carecen de destreza artística.

Ciertos proponentes de los métodos semióticos defienden la validez de los mismos en manos de expertos avezados. No es lo que comprobó un grupo de investigadores: los expertos que aplicaron el Test de Dibujar una Persona anduvieron menos finos que los recién licenciados a la hora de distinguir entre la normalidad y la anormalidad psicológicas.

Podrían servir algunos sistemas de evaluación global, no basados en signos. En vez de dar por supuesta una correspondencia exacta entre una característica de un dibujo y un rasgo de la personalidad, los psicólogos que aplican tales métodos combinan muchos aspectos de las imágenes para hacerse con una impresión general de la adaptación de la persona. En un estudio de 52 niños, una prueba de evaluación global ayudó a distinguir los individuos normales y los que padecían trastornos de talante o ansiedad. En otro informe, la interpretación global sirvió para distinguir con acierto a 54 niños y adolescentes normales de otros que eran agresivos o extremadamente rebeldes. Quizás el enfoque global funcione mejor que el semiótico debido a que la agregación de información podría cancelar el “ruido”

procedente de variables que desvíen o menoscaben la información.

Nuestra revisión de la bibliografía indica, además, que tal como suelen desarrollarse, el Rorschach, el TAT y los tests de dibujar una figura humana solamente son útiles en muy limitadas circunstancias. Y lo mismo ocurre con otros métodos proyectivos.

También hemos comprobado que, aun cuando los métodos evalúen lo que pretenden medir, tiende a faltarles "validez aditiva": raramente añaden gran cosa a la información que puede obtenerse por otros medios menos pretenciosos, es decir, entrevistas o tests de personalidad objetivos. (Los tests objetivos piden que se responda a preguntas claras y definidas, tales como: "Tengo con frecuencia pensamientos de estar perjudicándome a mí mismo: ¿Verdadero o falso?"). Este inconveniente de los métodos proyectivos hace que sea difícil de justificar el dinero y el tiempo que cuestan.

¿Qué decisión tomar?

Algunos psicólogos y psiquiatras no están de acuerdo con nuestras conclusiones. Sostienen que las pruebas proyectivas presentan una larga historia de uso constructivo y, si son aplicadas e interpretadas debidamente, pueden traspasar la costra de los informes que de sí mismos van dando los sujetos y proporcionar una visión de los más hondos recovecos de sus mentes. En sus críticas alegan que hemos insistido en los resultados negativos sin tener en cuenta los positivos.

Recriminaciones aparte, nuestras conclusiones están respaldadas por la investigación. Mientras nuestros hallazgos son negativos, quizá los otros estén pintando en rosa la imagen de los métodos proyectivos, inducidos por el selectivismo excluyente propio del dibujante. Sabido es que hay más probabilidades de que las revistas científicas publiquen los informes que demuestren que un procedimiento funciona que no los que lo encuentren fallido o inservible. Así pues, no es raro que los investigadores den carpetazo a sus datos negativos, que nunca saldrán a la luz.

A nosotros nos parece preocupante que los psicólogos apliquen pruebas proyectivas en situaciones para las que su validez no ha podido demostrarse. Muchas personas pueden sufrir graves consecuencias si unos diagnósticos erróneos influyen en los planes terapéuticos, en las normas de custodia o en las decisiones de los tribunales de justicia. Basándonos en nuestras investigaciones, urgimos con insistencia a los psicólogos que reduzcan la utilización de la mayoría de las pruebas proyectivas y que, cuando las hayan seleccionado debidamente, se limiten a puntuar e interpretar el corto número de variables que se ha comprobado fidedignas.

Nuestros resultados ofrecen también una lección más amplia a los psicólogos ejercientes, a los alumnos de psicología y al público en general: la de que aun a profesionales muy avezados pueden engañarles sus intuiciones y su fe en instrumentos de cuya eficacia no hay pruebas sólidas.

Bibliografía complementaria

THE RORSCHACH: A COMPREHENSIVE SYSTEM, VOL. 1: BASIC FOUNDATIONS. 3ª edic. John E. Exner. John Wiley & Sons, 1993.

THE COMPREHENSIVE SYSTEM FOR THE RORSCHACH: A CRITICAL EXAMINATION. James M. Wood, M. Teresa Nezworski y William J. Stejskal en *Psychological Science*, vol. 7, n.º 1, págs. 3-10; enero 1996.

STUDYING THE CLINICIAN: JUDGMENT RESEARCH AND PSYCHOLOGICAL ASSESSMENT. Howard N. Garb. American Psychological Association, 1998.

EVOCATIVE IMAGES: THE THEMATIC APPERCEPTION TEST AND THE ART OF PROJECTION. Dirigido por Lon Gieser y Morris I. Stein. American Psychological Association, 1999.

PROJECTIVE MEASURES OF PERSONALITY AND PSYCHOPATHOLOGY: HOW WELL DO THEY WORK? Scott O. Lilienfeld en *Skeptical Inquirer*, vol. 23, n.º 5, págs. 32-39; septiembre/octubre 1999.

THE SCIENTIFIC STATUS OF PROJECTIVE TECHNIQUES. Scott O. Lilienfeld, James M. Wood y Howard N. Garb en *Psychological Science in the Public Interest*, vol. 1, n.º 2, págs. 27-66; noviembre 2000.

Emisión de electrones por efecto campo

Mediante la combinación del fenómeno de la emisión de campo con técnicas propias de la microelectrónica se han abierto camino nuevos dispositivos, desde minúsculos sensores hasta propulsores de vehículos espaciales, pasando por pantallas ultraplanas

Pedro A. Serena, Juan José Sáenz, Antonio Correia y Tim Harper

A lo largo de los últimos cien años se han producido cambios sin precedentes gracias a la revolución técnica que supuso la utilización de corrientes de electrones para mover máquinas, transportar energía, y generar y recibir ondas electromagnéticas. Si el siglo XIX fue testigo de la mecanización industrial y el desarrollo de los motores térmicos, en simbiosis con el desarrollo de la termodinámica, la centuria recién cerrada ha estado condicionada por la electrónica.

Bajo ese término incluimos los saberes y técnicas por los que se puede controlar el flujo de electrones entre distintos materiales para producir efectos que se plasman en dispositivos. Desde 1897, año en que Joseph John Thomson utilizó un tubo de rayos catódicos para estudiar las propiedades de los electrones, hasta nuestros días, la sociedad ha evolucionado gracias a la aparición de herramientas electrónicas que han modificado nuestra forma de entender los procesos industriales, la economía, las comunicaciones y los hábitos sociales.

El perfil funcional de los dispositivos electrónicos toma mil formas. Basta echar un vistazo a nuestro alrededor para encontrarnos con receptores de radio, microprocesadores, lámparas, motores, sensores, monitores de televisión, hornos microondas, etcétera. Una lista interminable. No es difícil percatarse de los beneficios obtenidos de la "domesticación" del electrón.

La electrónica ha evolucionado por caminos paralelos: la electrónica de estado sólido y la electrónica de vacío. La primera abarca los dispositivos basados en el movimiento de electrones a través de la materia (metales, semiconductores). El desarrollo de la electrónica de estado sólido, espectacular en los últimos 50 años, ha dado lugar a la microelectrónica, en su búsqueda incesante de reducción de tamaño y aumento de rapidez, con el aumento consiguiente de la complejidad de los dispositivos.

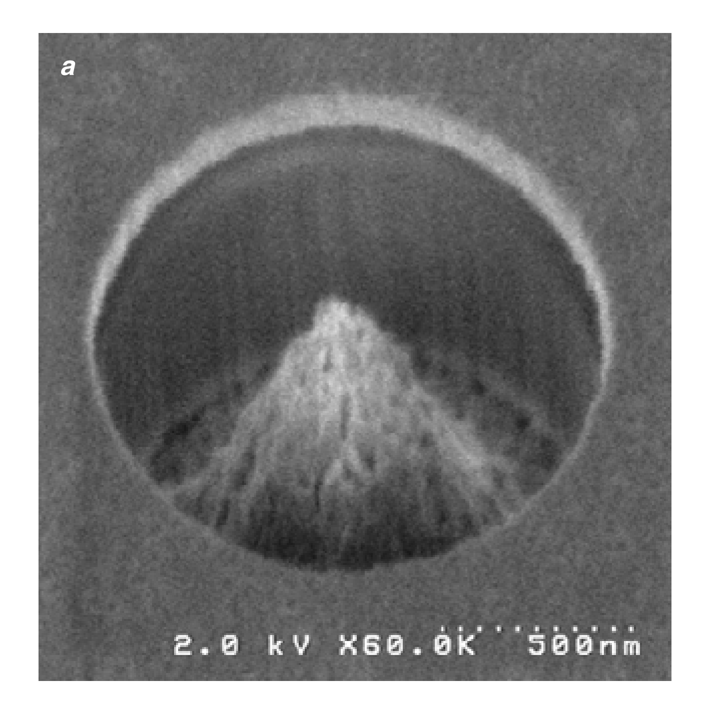
La segunda línea evolutiva, la electrónica de vacío, aprovecha las corrientes electrónicas que se desplazan en sistemas donde se ha efectuado un vacío adecuado. Un monitor de televisión o un microscopio electrónico se apoyan en esta forma de manipular haces de electrones.

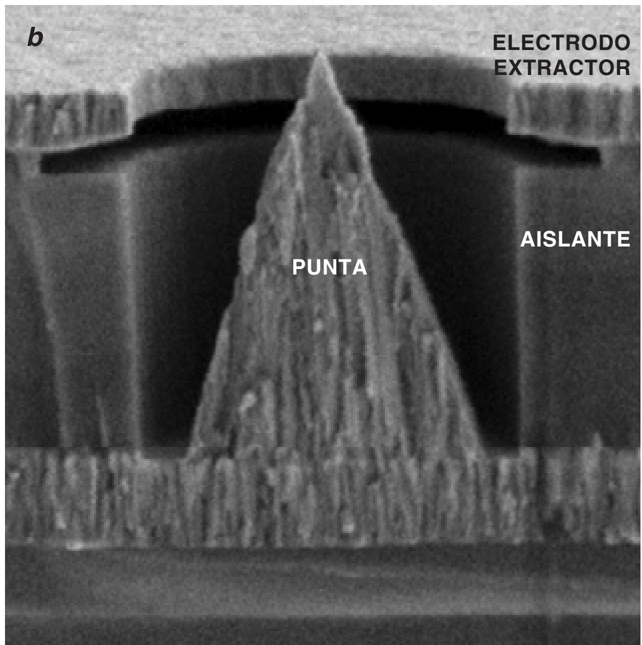
Observando los equipos que usamos en nuestros hogares o puestos de trabajo, cabría pensar que los dispositivos de estado sólido han superado en versatilidad y volumen de negocio a los desarrollos de la electrónica de vacío, que muestran síntomas de cierto estancamiento. No siempre fue así. En los albores del siglo XX el avance de la electrónica se cimentó sobre el triodo o válvula de vacío (desarrollado por Lee De Forest en 1907). Ese dispositivo tan simple persistió en nuestro entorno (receptores de radio y televisión) hasta no hace mucho tiempo. Los triodos constituyeron los componentes esenciales de las primeras computadoras. El propio sistema de cálculo ENIAC, puesto en marcha en 1940, contaba con 18.000 triodos. Sistemas similares de cálculo pervivieron hasta principios de los años sesenta.

Con la llegada del transistor se inicia otra revolución, que entraña el paulatino abandono de los triodos, el inicio de la miniaturización de los circuitos y el auge de la microelectrónica. Sin embargo, cuando John Bardeen y Walter Brattain presentaron su histórico artículo sobre el transistor en 1948 lo titu-

El autor

PEDRO A. SERENA, JUAN JOSE SAENZ, ANTONIO CORREIA y TIM HARPER han abordado desde enfoques complementarios la emisión de electrones. Serena, adscrito al Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, y Sáenz, del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad Autónoma de Madrid, estudian aspectos básicos de la emisión de campo y modelan complejos sistemas de microelectrónica de vacío. Correia y Harper desarrollan su actividad en la empresa CMP-Científica S.L. de nanotecnología aplicada, asociada a la Agencia Espacial Eu-





1. MICROEMISOR INTEGRADO. Se recurre a técnicas litográficas para fabricar micropuntas metálicas cuyos extremos miden unos pocos nanómetros de radio de curvatura (*a*). Dichas puntas están integradas con lentes electrostáticas y otros componentes electrónicos. En (*b*) podemos ver una sección transversal de una micropunta, donde la capa metálica superior hace de sistema extractor de electrones al poseer voltaje positivo respecto de la punta (*c*). Los potenciales se distribuyen de suerte que en el extremo de la punta se generen intensos campos eléctricos que insten la emisión de electrones por efecto de campo. Las dimensiones del sistema son de unas pocas micras en cada dirección.

c
ELECTRODO
EXTRACTOR
PUNTA

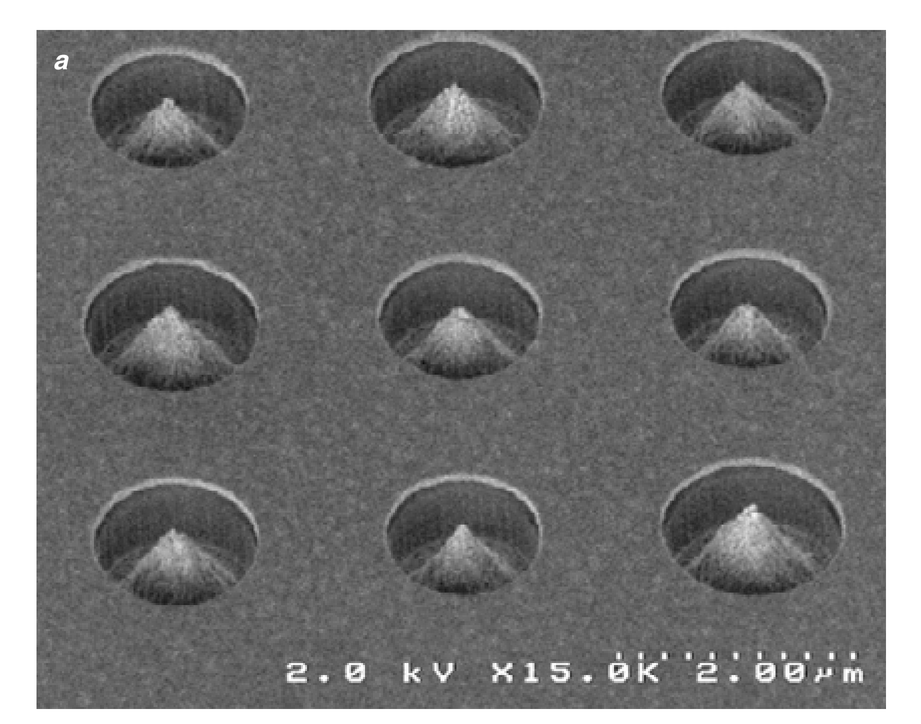
laron “El transistor: un TRIODO semiconductor”, aludiendo al elemento electrónico por antonomasia en aquellos momentos.

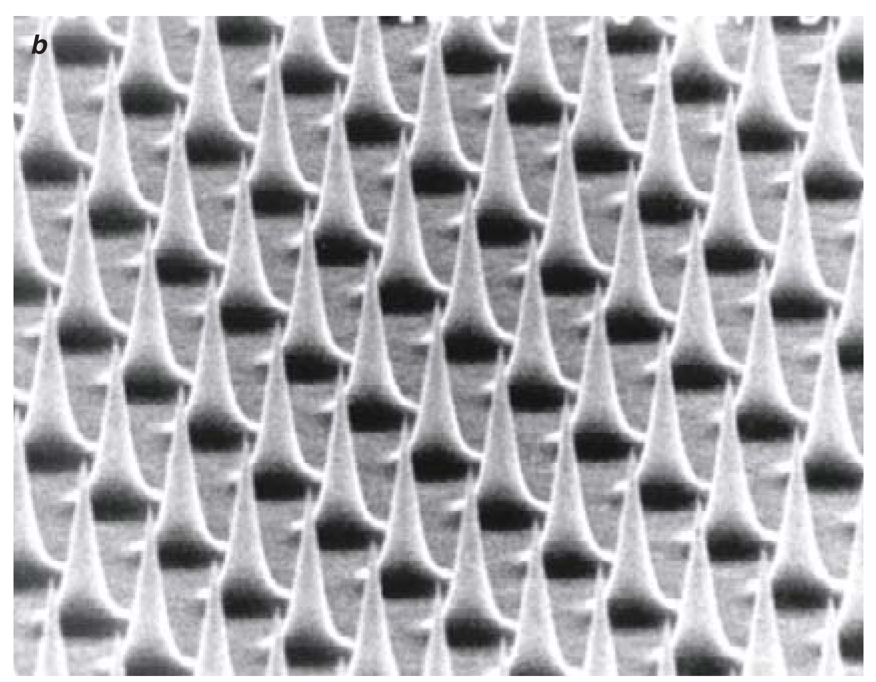
Todo cambió en 10 años. En 1959 apareció la segunda generación de computadoras, basada ya en microprocesadores. Quizá la historia hubiera sido otra de atenderse los trabajos realizados por K. Shoulders a finales de los años cuarenta. Este investigador del Instituto de Tecnología de Massachusetts propuso un dispositivo de vacío, pequeño, con funcionamiento electrostático y características similares a las del transistor. Se trataba, en realidad, de un microtriodo de vacío.

Sin embargo, el apoyo económico y el interés de la industria se marcharon tras la idea del transistor. La microelectrónica comenzó a dar sus pasos hacia el estado sólido, relegando a la electrónica de vacío a la fabricación de monitores y otros sectores restringidos. En 1968 el grupo de Shoulders fabrica los primeros microemisores de molibdeno siguiendo un método propuesto por C. Spindt, que permitía generar emisores puntiagudos de electrones. Semejante configuración se revelaría decisiva para mejorar la emisión de electrones. A este tipo de emisores se les denomina emisores “Spindt”.

En los años setenta y ochenta se producen avances sustanciales en los procesos de fabricación. El grupo encabezado por H. F. Gray, del norteamericano Laboratorio de Investigación Naval, construye en 1987 el primer transistor de vacío microfabricado. Desde ese momento surge una nueva forma de concebir dispositivos mediante técnicas de fabricación propias de la microelectrónica, observándose una tendencia hacia la miniaturización de los dispositivos de vacío y hacia su integración con otros elementos con un resultado final más compacto, menos voluminoso y de mayores prestaciones. Esta alianza de saberes define a la microelectrónica de vacío (VME).

Para describir cualquier dispositivo de electrónica (o microelectrónica) de vacío podemos valernos de un esquema sencillo. En





2. LA UNION HACE LA FUERZA. En situaciones donde se necesiten altas densidades de corriente se puede repetir la estructura de un microemisor integrado y generar superficies formadas por millares de ellos (*a*). En una superficie de 1 mm^2 se pueden alojar más de 100.000 pequeños emisores. No sólo se emplean metales para fabricar conjuntos de microemisores. Otros materiales proporcionan también altos rendimientos. Por ejemplo, en (*b*) se muestra un conjunto de emisores de silicio. En este caso, los elementos individuales son muy parecidos entre sí.

primer lugar necesitamos una fuente de electrones, de adecuadas prestaciones en función de la aplicación requerida. Una vez emitidos, los electrones se mueven en una región donde se ha practicado el vacío (que impide encuentros del haz de electrones con moléculas de gas que distorsionen el "viaje" del electrón). La evolución del haz de electrones está gobernada por los campos electromagnéticos. Dicho haz también puede ser colimado mediante diafragmas y obturadores, para así orientarlo y enfocarlo, concentrando a voluntad el flujo de electrones sobre el objetivo deseado. Este punto final de trayecto para el haz electrónico puede ser un píxel (unidad de información visual) sobre una pantalla, dando lugar a una señal luminosa, como ocurre en un monitor de televisión. El final del trayecto puede ser también una muestra que dispersa el haz o produce electrones secundarios, susceptibles de análisis, como acontece en un microscopio electrónico.

En un dispositivo de microelectrónica de vacío, lo mismo la fuente de electrones que los sistemas de control del haz (las lentes electromagnéticas) tienen dimensiones micrométricas, con los beneficios que ello reporta para las aplicaciones donde importen la reducción de tamaño o la disipación de energía. Las ventajas fundamentales de los dispositivos VME sobre los de estado sólido estriban en su relativa insensibilidad al calor y la radiación, así como su mayor velocidad; gracias a la insensibilidad operan en una mayor variedad de condiciones; el movimiento de los electrones en el vacío, sin colisiones, explica la segunda característica. Apoyados en el aumento de la velocidad de propagación podemos diseñar sistemas que funcionen a altas frecuencias, con altas velocidades de refresco.

La clave de un dispositivo de microelectrónica de vacío reside en la fuente de electrones, cuyas propiedades determinan el tipo de aplicación, el rendimiento y la duración del dispositivo. Desde el nacimiento de la electrónica de vacío importó entender los mecanismos de la emisión de electrones desde diversos materiales (los estudios del efecto fotoeléctrico por Albert Einstein a principios del siglo XX son buena prueba de ese interés). Hoy conocemos varios mecanismos capaces de emitir electrones desde una superficie conductora. Nos ceñiremos a los que afectan a los emisores usados en electrónica de vacío: la tempera-

tura y el campo eléctrico que se aplica en la superficie.

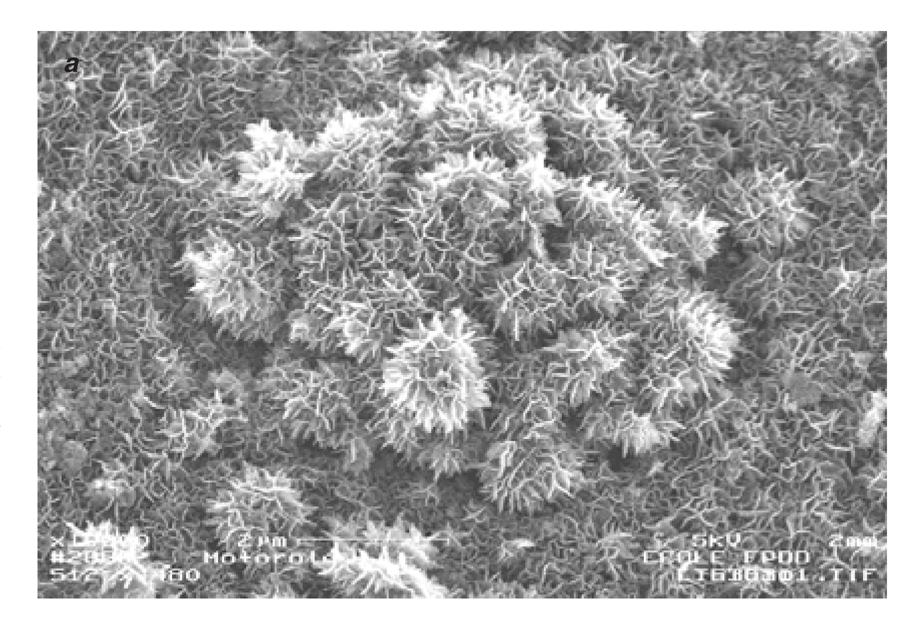
Antes de describir dichos mecanismos, hagamos un rápido boceto de un metal. En un metal los electrones se mueven en libertad y forman lo que se llama “un mar de Fermi”. Estos electrones no emergen espontáneamente del material. Para escapar necesitan cierta cantidad de energía que les permita franquear una barrera característica para cada material; dicha energía, o “función de trabajo”, suele ser de unos pocos electronvolt.

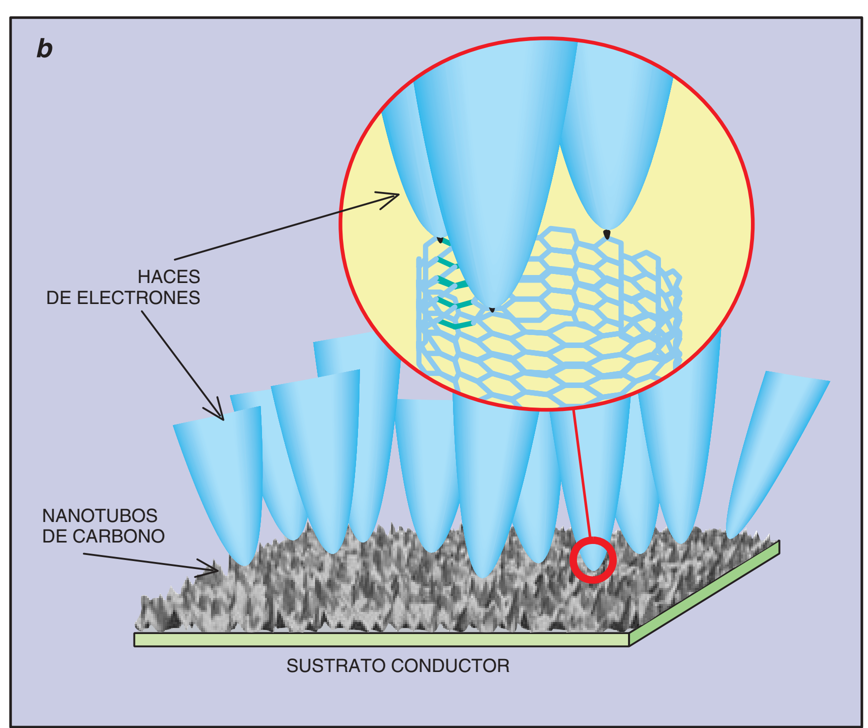
El primer mecanismo de emisión, conocido por fenómeno de emisión termoiónica, es sencillo de entender. Mediante una excitación térmica, el electrón adquiere la energía precisa para escapar de la atracción del metal. A medida que se eleva la temperatura, aumenta la probabilidad de que la partícula supere la barrera y se intensifica la corriente electrónica.

El segundo mecanismo de emisión es más sutil. Cuando sobre una superficie metálica se aplica un campo electrostático (que tienda a extraer electrones del sistema), se produce una situación parecida a la de un embalse donde el agua permanece confinada por un muro de anchura y altura determinadas. En el caso del metal, el “mar” de electrones está represado por una barrera cuya altura y anchura controla el campo aplicado. A medida que el campo crece, la altura y anchura de la barrera decrecen.

Por fortuna para los electrones, su situación difiere de lo que ocurre en el embalse. La mecánica cuántica predice que la barrera es franqueable con cierta probabilidad mediante el efecto túnel, y así acontece. A bajas temperaturas, y en presencia de campos eléctricos adecuados, se observa una corriente asociada a los electrones que atraviesan la barrera. Para referirnos a ese mecanismo empleamos la expresión “emisión por efecto del campo electrostático” o, más sencillamente, “emisión por efecto campo” (FE, de *Field Emission*).

Puesto que no se requiere ninguna excitación térmica, los emisores FE son “cátodos fríos”. La emisión de campo hunde sus raíces en la física cuántica y ha auspiciado grandes avances a lo largo del siglo XX. Se considera a E. E. Muller el padre de la disciplina. El desarrolló en 1936 el primer microscopio de efecto campo y, en 1951, construyó el microscopio de emisión de iones por efecto campo (FIM, *Field Ion Microscope*). Con dicho microscopio, donde las partículas emitidas son iones, se observarían por primera vez átomos en 1956. Hubo que esperar casi dos décadas hasta que se alcanzara una resolución similar mediante un microscopio electrónico (que, por cierto, usaba una fuente de electrones de emisión de campo).



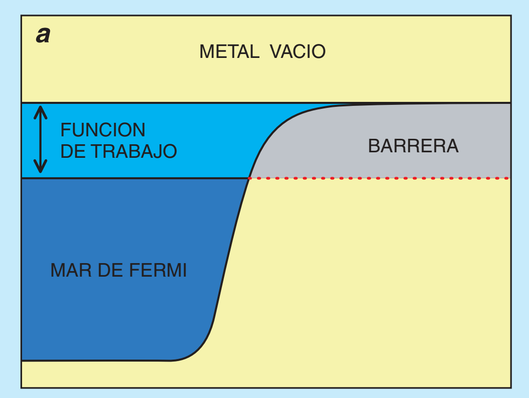


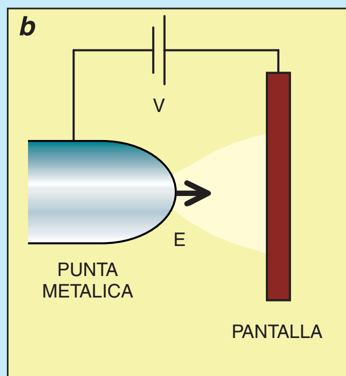
3. NUEVOS MATERIALES PARA EMISORES EFICIENTES. Para obtener intensas emisiones de electrones podemos emplear superficies recubiertas de carbono amorfo, diamante, nanotubos de carbono y otros. A menudo la emisión guarda relación con la morfología del sistema, como ocurre en láminas de carbono tipo “coral” (*a*) con millares de micropuntas que contribuyen a la emisión de electrones. En superficies recubiertas de nanotubos de carbono, la emisión arranca de los átomos que ocupan posiciones más extremas de los nanotubos (*b*).

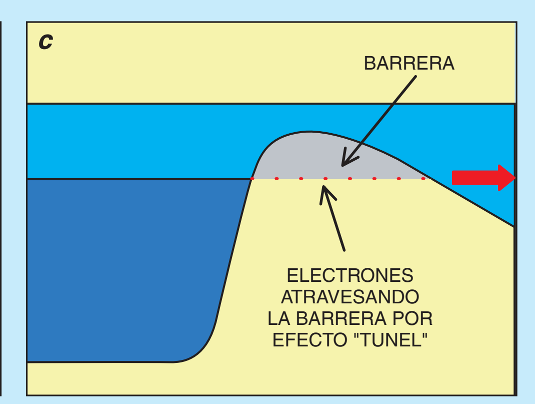
Fundamentos de la emisión de campo

La emisión de campo consiste en la emisión de electrones sometidos a la acción de un campo electrostático. En ausencia de campo eléctrico aplicado (*a*), los electrones de un metal se encuentran confinados por una barrera de potencial que impide su emisión hacia el exterior. La altura de dicha barrera, o "función de trabajo", toma valores diferentes para cada material.

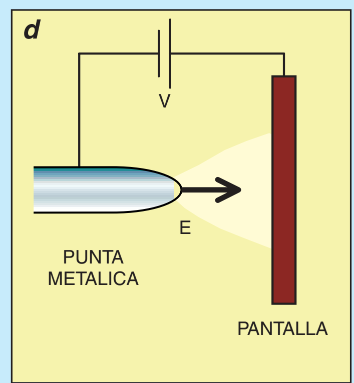
Si un metal en forma de punta metálica se sitúa frente a un electrodo plano (*b*) y entre ambos se aplica una diferencia de potencial V, aparece un intenso campo electrostático **E** en el extremo de la punta que modifica la forma de la barrera confinadora de los electrones (*c*). Ahora los electrones pueden atravesar la barrera mediante efecto túnel, según predice la física cuántica, dando lugar a una corriente de electrones que escapan desde la punta hacia el electrodo plano y se propagan por el vacío.

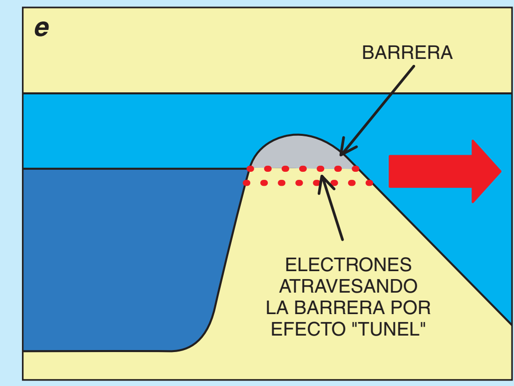






Si la punta tiene un menor radio de curvatura (*d*), el campo electrostático **E** crece y la barrera de potencial se hace más baja y estrecha (*e*), provocando un aumento considerable de la corriente emitida. Otra forma de intensificar la emisión se logra escogiendo materiales de menor función de trabajo o aplicando mayores potenciales. Este último método permite una fácil variación de la corriente emitida controlando el potencial aplicado a la punta.





Ya sabemos de la capacidad de los electrones para atravesar la barrera que les separa del vacío y salir impulsados hacia el exterior. Pero, ¿podemos controlar el número de electrones emitidos? Podemos. Si disminuimos la función de trabajo, mengua entonces la altura de la barrera que confina a los electrones y aumenta la emisión electrónica. Sin embargo, la función de trabajo del material no puede modificarse una vez fabricado el emisor. Hay otra forma de controlar la intensidad, o brillo, de la emisión: con el campo eléctrico. Un campo intenso aplicado sobre la superficie determina también un menor grosor de la barrera y una mayor emisión. El campo electrostático es una magnitud que sí varía mediante la aplicación de potenciales. Dicho de otro modo, el voltaje aplicado al emisor nos faculta para controlar el flujo de electrones emitidos.

Por lo general, la forma del emisor es aguda (una punta) porque los campos electrostáticos se hacen mayores en regiones de gran curvatura. No es otro el motivo de la estilización de los pararrayos. En ambos casos estamos ante una manifestación de la "ley de las puntas". Aplicando unos miles de volt a una punta metálica de 100 nanómetros de radio se obtienen campos suficientes para provocar la emisión electrónica.

Con las modernas técnicas litográficas se fabrican puntas agudísimas con radios de curvatura de 10 nanómetros. Por tanto, bastarán unos centenares de volt para desencadenar corrientes de interés en múltiples aplicaciones. En algún caso se ha reducido el radio de curvatura hasta el nanómetro y obtenido así con unas pocas decenas de volt emisión electrónica. La situación se hace más interesante cuando se fabrican emisores/puntas que acaban en uno o unos cuantos átomos, lo que acontece en el dominio de la nanotecnología (*véase* "¿Ante una nueva revolución?", por G. Stix, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1996).

Para un emisor acabado en sólo un átomo se tiene garantizado un campo electrostático bastante elevado, aunque se opere a voltajes

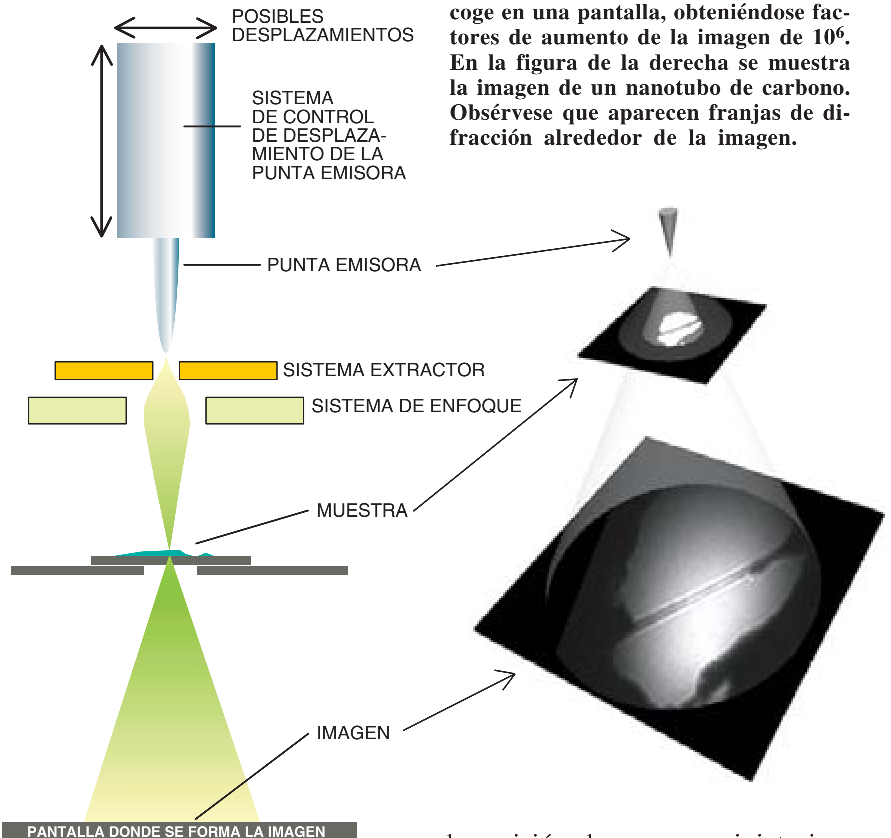
bajos. Con todo, no es ése el aspecto más interesante. Si analizamos la secuencia de emisión desde tales nanopuntas, resulta fácil entender que todos los electrones sufren un proceso similar al ser emitidos desde la misma región, siendo réplicas unos de otros. Recordando que la mecánica cuántica nos enseña que las partículas poseen el carácter dual onda-corpúsculo, la "clonación" de las partículas emitidas se traduce en una gran "coherencia" del haz emitido; permite su aplicación en holografía electrónica para abordar experimentos similares a los que se pueden efectuar con luz. Es decir, a medida que reducimos las dimensiones del emisor nos encontramos con interesantes efectos que aumentan las posibilidades de uso de estas nanopuntas.

La necesidad de utilizar emisores de efecto campo en distintos sectores de la industria ha estimulado la búsqueda de nuevos materiales que posean óptimas características de emisión y permitan obtener altas densidades de corriente. En esa dirección se ha apostado por abandonar los emisores metálicos en favor del silicio, silicio poroso, óxido de aluminio poroso, metales líquidos o materiales de gran ancho de banda prohibida. También se ha propuesto usar recubrimientos específicos sobre materiales tradicionales, en particular recubrimientos con películas de diamante y películas de nanotubos de carbono o de moléculas de fullerenos (C60). Aunque los resultados obtenidos han sido satisfactorios, no siempre se ofrece una descripción razonable de los mecanismos de emisión.

La investigación en emisión de campo ha traído avances colaterales en otras ramas del saber, pero su renacer se debe a la posibilidad de miniaturizar los emisores y de poder integrarlos junto con otros componentes fabricados mediante técnicas clásicas de microelectrónica. El contar con un emisor de electrones muy brillante, de gran densidad de corriente, y de tamaño nanométrico no es útil en muchas ocasiones donde se requiere un flujo neto de electrones mucho mayor. En estas situaciones la microelectrónica proporciona una solución. ¿Por qué un único emisor? Mediante técnicas litográficas comunes es posible repetir la estructura de un único emisor, formando una red de emisores sobre una superficie. Cada uno de estos emisores se fabrica de suerte que, en su entorno, se sitúen, por el mismo proceso litográfico, lentes electromagnéticas que permitan crear, desviar o enfocar el haz de electrones. De esta manera podemos tener sistemas donde hay un solo emisor o sistemas multiemisores, en función de la aplicación de interés.

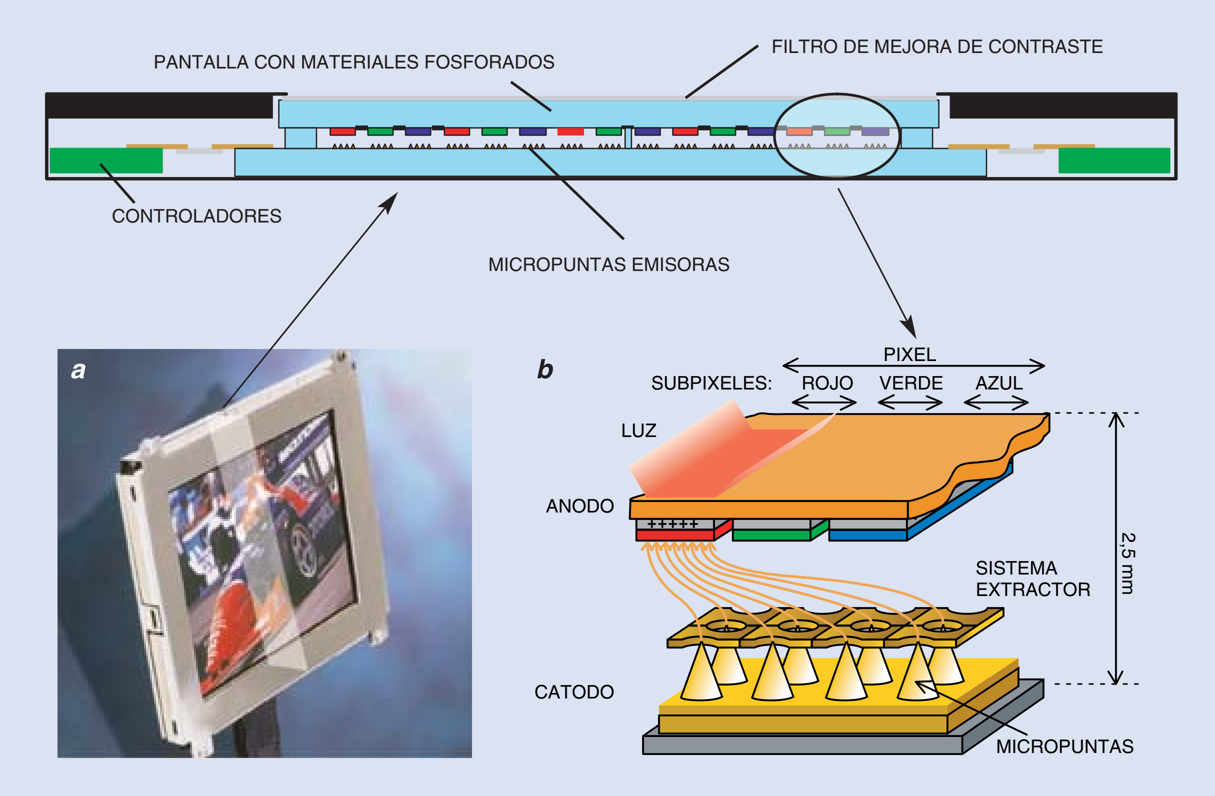
En el caso de los sistemas multiemisor se controla cada emisor por separado y se incluyen las conexiones necesarias con las fuentes de alimentación correspondientes. Sobre una sola oblea se fabrican así decenas de miles de microemisores, activados a voluntad y cuyos haces emitidos pueden desviarse en la dirección deseada. Las fuentes de electrones operan por la emisión de campo; miniaturizadas e integradas con otros elementos constituyen elementos de microelectrónica de vacío. Pero existen otras aplicaciones donde es primordial el control de la fuente de electrones, se halle integrado o no el emisor con el resto de componentes.

Veamos algunas de estas aplicaciones donde no se requieren técnicas de integración. Con la obtención de emisiones razonables desde micropuntas de pequeño radio de curvatura mediante la aplicación de voltajes pequeños (decenas de volt) se ha desatado una carrera por desarrollar microscopios electrónicos de barrido de baja energía. Estos equipos se caracterizan por poseer unas dimensiones



4. MICROSCOPIOS ELECTRONICOS de baja energía. Gracias a los emisores puntiformes con muy pequeño radio de curvatura se obtienen intensos campos eléctricos y elevadas corrientes con sólo aplicar unas decenas de volt. Los electrones emitidos, al ser menos energéticos, pueden manipularse con ayuda de lentes electrostáticas que enfoquen y desvíen el haz hacia el lugar deseado de la muestra. Una variante de este tipo de equipos es el microscopio de proyección; el haz incide en la muestra y posteriormente evoluciona ensanchándose hasta que se recoge en una pantalla, obteniéndose factores de aumento de la imagen de 10^6. En la figura de la derecha se muestra la imagen de un nanotubo de carbono. Obsérvese que aparecen franjas de difracción alrededor de la imagen.

El funcionamiento de una pantalla de emisión de campo



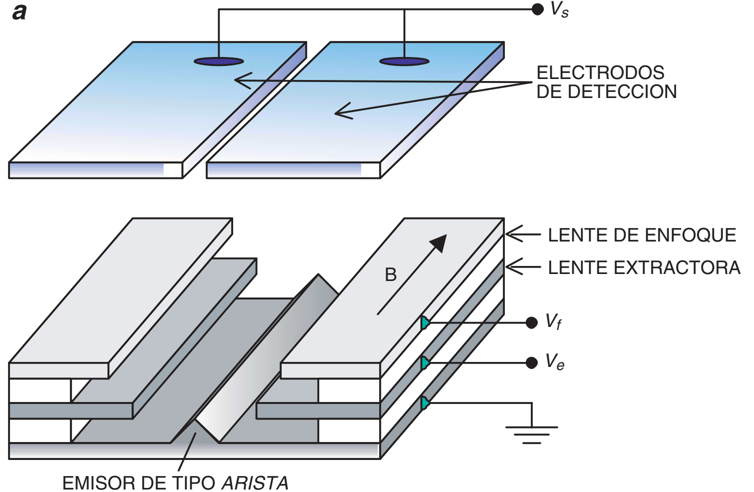
Una pantalla de emisión de campo (FED) como la mostrada en (*a*) está formada por dos láminas delgadas distantes entre sí unos milímetros (*b*). En una de ellas encontramos un sistema de píxeles y subpíxeles que forman la imagen (correspondientes a los tres colores fundamentales) y un sistema de filtros para mejorar su nitidez. Los píxeles (constituidos por tres subpíxeles, uno por cada color fundamental) están fabricados por materiales fosforados.

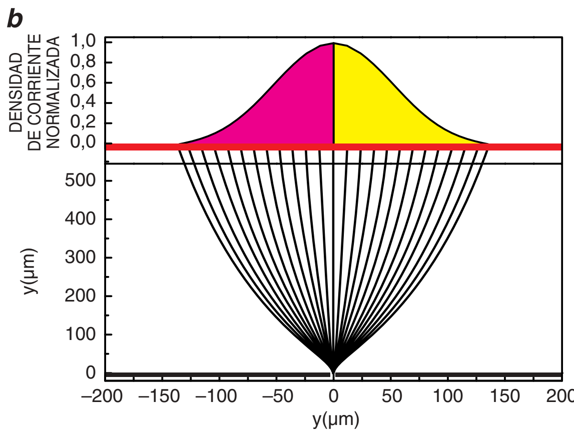
La primera lámina es similar a la que encontramos en los monitores comunes. La otra lámina, que genera el flujo de electrones, es la que realmente caracteriza a la pantalla FED; consta de cientos de miles de micropuntas integradas (microemisores). Cada subpíxel recibe el flujo de electrones provenientes de miles de micropuntas, que trabajan en exclusiva para él. Esta es la principal diferencia con los monitores de tubos de rayos catódicos.

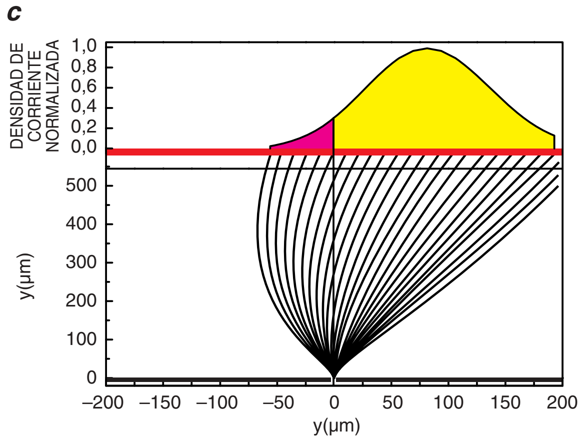
En un monitor de tubos de rayos catódicos, los electrones parten de un emisor único. Mediante un sistema de campos electrostáticos, se desvía el haz de forma sincronizada a los distintos píxeles. Para que el tiempo de vuelo de los electrones desde el emisor hasta el píxel sea similar para cada píxel, el emisor se sitúa a una distancia adecuada de la pantalla. Esto implica que la pantalla se agranda a medida que cambian sus dimensiones laterales.

En una pantalla FED sus dimensiones laterales no condicionan el espesor del monitor (de hecho el espesor es de sólo 2-3 milímetros), aspecto que resulta decisivo para poder desarrollar la televisión de alta definición. Hay otras ventajas: tampoco se necesitan sincronizaciones que tengan en cuenta la formación de la imagen mediante barridos y, por tanto, desaparecen los parpadeos molestos. Podemos decir que la imagen "fluye de forma continua". El hecho de que los microemisores funcionen a bajos voltajes hace que el consumo se reduzca bastante.

La pantalla FED tiene ventajas adicionales sobre las pantallas de cristal líquido o las pantallas de plasma, de espesor equiparable. La calidad de la imagen en un FED no se deteriora con el cambio del ángulo de observación y posee un contraste idéntico al del tubo de rayos catódicos. Además, sus condiciones de funcionamiento no dependen excesivamente de la temperatura. Motorola, Samsung, PixTech, PFE, Candescent, Ceravision, Axtron, Saint Gobain, SAES y Futaba llevan años investigando en este tipo de pantallas o en algunos de sus componentes (fósforos específicos, sellados, mejora de la duración de emisores). La investigación no se detiene y se tiende hacia pantallas basadas en emisores más eficientes y de menor consumo. Se han presentado ya prototipos de pantallas FED basadas en la emisión desde nanotubos de carbono.







5. SENSOR DE CAMPO MAGNETICO, un dispositivo de microelectrónica de vacío. Los emisores de efecto campo microfabricados pueden utilizarse en la construcción de diversos tipos de sensores. En el sensor de campo magnético (*a*), el haz de electrones emerge de un conjunto de puntas o de una arista. En ausencia de campo magnético, B = 0, el haz emitido no sufre desviación alguna y los dos electrodos de detección miden la misma cantidad de corriente (*b*). En presencia de un campo magnético, el haz de electrones es desviado y un colector de electrones recoge más corriente que el otro (*c*). A partir de la diferencia de corrientes se determina la magnitud del campo magnético. Mediante la adecuada selección de los distintos voltajes del sensor (extracción, focalización, etcétera) podemos modificar su eficiencia y rango de medida. Usando similares configuraciones se han diseñado sensores de presión, temperatura, inerciales y otros.

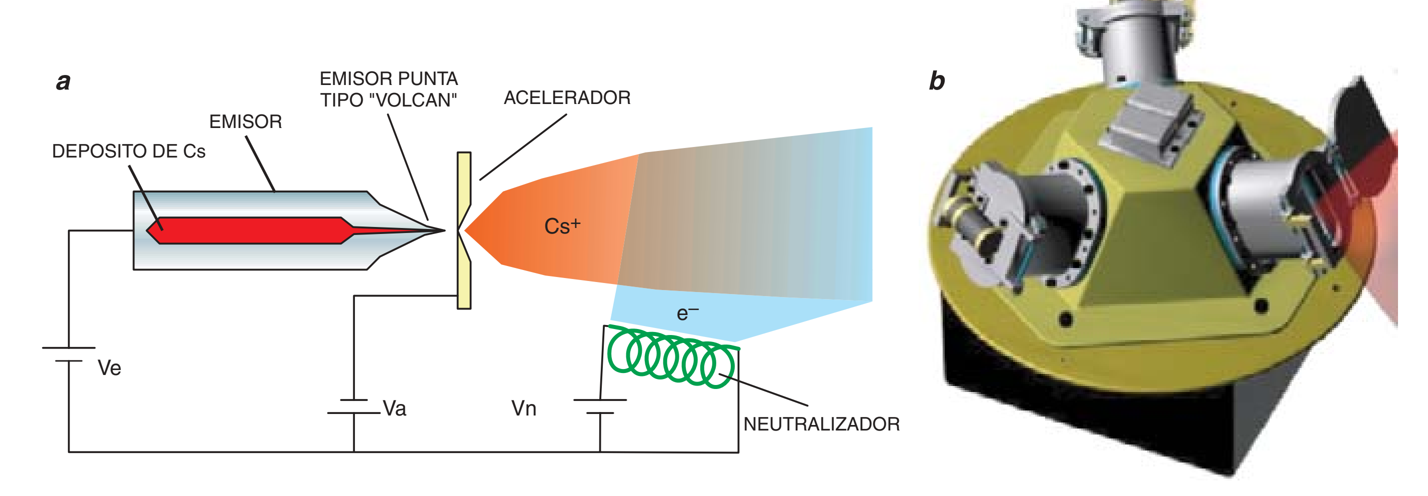
mucho más reducidas que los microscopios electrónicos corrientes debido al menor tamaño de las lentes y colimadores necesarios para enfocar el haz electrónico sobre la muestra.

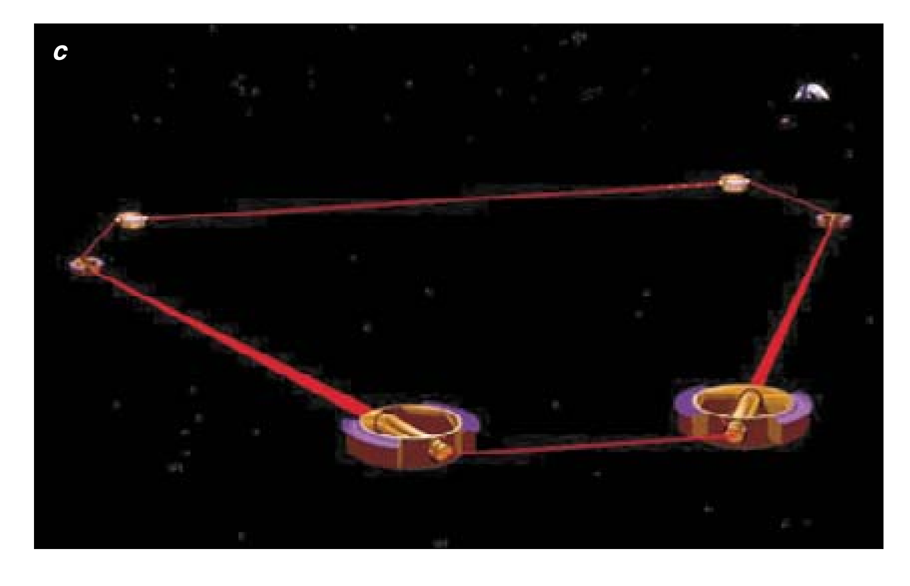
Dentro de esta familia de dispositivos encontramos el microscopio de proyección, que recuerda al funcionamiento de un retroproyector. En tal microscopio el emisor electrónico coherente (recordemos que la emisión se produce a través de unos pocos átomos) se sitúa cerca de la muestra. Los electrones emitidos, desviados por la muestra, viajan hasta una pantalla lejana, donde se recoge y analiza la imagen electrónica. A menor distancia entre la fuente y la muestra, mayor aumento del microscopio. Además de obtener una imagen de la "sombra electrónica" del objeto se evidencian franjas de interferencia (causadas por disponer de una fuente coherente). Del análisis de dichas franjas se puede extraer información sobre la estructura del objeto. La ventaja fundamental de este tipo de equipos reside en el menor tamaño de los sistemas de enfoque del haz, lo que hace que su volumen y peso sean mucho menores en comparación con los microscopios electrónicos al uso.

Los microscopios descritos no son sólo una herramienta poderosa de análisis y caracterización. La posibilidad de enfocar un haz de electrones de baja energía ha hecho de estas fuentes firmes candidatos a nuevas aplicaciones donde se requiere un fácil manejo del haz. Además se puede enfocar el haz de forma que el tamaño del punto donde convergen los electrones es de unas decenas de nanómetros. Es decir, se dispone de una herramienta capaz de generar un punto "electrónico" que podemos mover. La aplicación es clara: usar dicho punto para escribir siempre que se disponga del "papel" adecuado; aquí, el papel es una capa de resinas diseñadas para reaccionar ante la débil densidad de corriente que proviene del microemisor.

Comparado con las técnicas de litografía óptica ese sistema de nanolitografía resulta lento, y seguramente no podrá competir con la litografía de rayos X, salvo que en un futuro próximo contemos con dispositivos de nanolitografía formados por miles de microemisores integrados operando en paralelo.

Los microemisores de emisión de campo se han introducido también en el diseño de nuevos sensores, cuyo eficaz rendimiento resulta determinante para el desarrollo de técnicas de control de procesos industriales, en robótica, en el funcionamiento de aviones, automóviles y vehículos espaciales. Un sensor de efecto campo se basa en detectar las variaciones que sufre un haz de electrones debido a la presencia de una perturbación exterior. Si dicha perturbación modifica los campos electromagnéticos de las regiones por donde se mueve un haz de electrones, entonces éste será desviado. La me-





6. NUEVOS SISTEMAS de propulsión en vehículos espaciales. La emisión de campo también se está aplicando en el desarrollo de nuevos propulsores en vehículos espaciales. El funcionamiento del propulsor *a* se basa en la ionización de átomos de cesio o indio por fuertes campos eléctricos creados en una punta. Por la perforación que hay en la punta fluye el combustible desde un depósito (punta de estructura de "volcán"). Los iones salen despedidos y proporcionan el impulso necesario. Los electrones perdidos por los átomos son emitidos por un mecanismo neutralizador que evita acumulación de carga. En un vehículo espacial se pueden acoplar varias unidades propulsoras (*b*). El impulso se puede controlar de forma continua evitándose vibraciones en la puesta en marcha o en la parada del propulsor. Se usarán motores de propulsión por emisión de campo (*c*) en la misión LISA, donde seis vehículos espaciales deben mantener unas posiciones relativas de forma precisa con el fin de medir ondas gravitacionales de baja frecuencia mediante interferometría.

dición de tal desviación nos permitiría estimar la magnitud de la perturbación.

Sabemos, por ejemplo, que la trayectoria de los electrones se modifica en presencia de un campo magnético. Un sensor de campo magnético mide la desviación que sufre el haz de electrones sometido a dicho campo. Esto se logra distribuyendo adecuadamente detectores de corriente dentro del dispositivo. Observando y comparando los cambios de las corrientes medidas (antes y después de la presencia de la perturbación) conocemos los cambios de trayectoria del haz electrónico operados.

De forma similar, mediante ingeniosas configuraciones, se fabrican sensores de presión, de temperatura o inerciales. Aunque el mecanismo de funcionamiento es más tosco que otros tipos de sensores, su principal ventaja estriba en su tamaño: el sistema emisor, constituido por lentes, vacío y detector de corrientes, puede ocupar 1000 μm^3. Estas dimensiones los hacen muy atractivos para su empleo en sistemas miniaturizados de control o en situaciones donde importe el peso de los dispositivos, como en equipos embarcados en naves espaciales. El poco volumen también permite incluir un gran número de sensores que proporcionan medidas redundantes necesarias para realizar estudios estadísticos.

En el diseño de los sensores intervienen multitud de parámetros, que requieren el concurso de técnicas numéricas para optimizar su funcionamiento. De la misma manera que existen complejos códigos informáticos para describir el funcionamiento de circuitos con dispositivos de estado sólido, hubo que desarrollar poderosas herramientas de simulación para los dispositivos de microelectrónica de vacío.

De todas las aplicaciones de la emisión de campo, la que más impacto tendrá en los próximos años es la relacionada con el diseño y fabricación de monitores ultraplanos. Es necesario encontrar sistemas de visualización de pequeño espesor para desarrollar equipos receptores de la televisión de alta definición, para fabricar ordenadores de sobremesa y portátiles más ligeros, para aumentar la calidad de la información gráfica que aparece en teléfonos celulares, cámaras de vídeo, equipos industriales y otros. Hay varias técnicas en pugna por hacerse con el control de este mercado. Unas se basan en monitores tradicionales, otras en cristales líquidos o pantallas de plas-

La red europea de emisión de campo

En los últimos 10 años hemos asistido al renacimiento del fenómeno de la emisión por efecto campo de la mano de la microelectrónica de vacío (VME). La fabricación de dispositivos VME y su aplicación revolucionará algunas ramas técnicas. Sin duda alguna, el desarrollo estrella es la pantalla ultraplana de emisión de campo.

El enorme mercado existente, demandante de sistemas más rápidos, eficientes y baratos, hace que las empresas del sector de la electrónica hayan apostado por los desarrollos de la VME. ¿Cuál es el papel de Europa en este panorama de tan rápida evolución? Estados Unidos, Japón y Corea están a la cabeza de la investigación. Europa desempeña un papel secundario, con menor tejido industrial en microtécnica. Para cambiar esta situación ha sido necesario establecer una red europea sobre emisión de campo. Dicha red, lanzada por la Fundación Europea para la Ciencia, está coordinada por la empresa española CMP-Científica en colaboración con el laboratorio francés LETI/CEA. Con la red, que opera centralizando información sobre la emisión de campo y la microelectrónica de vacío, se pretende fomentar las colaboraciones entre los sectores académicos e industriales europeos.

ma, pero el tipo de pantalla con futuro más prometedor está basado en la emisión de campo (FED).

El funcionamiento de un monitor tradicional y un FED es similar. En ambos, los electrones emitidos desde un emisor viajan hasta colisionar en una pantalla de material fosforado. En el primero, el haz de electrones emitido desde un cañón de electrones se mueve de píxel a píxel en la pantalla (a un ritmo de 24 barridos por segundo), merced a un complejo sistema de sincronización. Para tener un funcionamiento sencillo, sin correcciones específicas para cada píxel, todos los puntos de la pantalla deben hallarse a una distancia similar del cañón, lo que determina un tamaño bastante grande del monitor.

En la pantalla con emisión de campo cada píxel recibe el bombardeo de electrones que provienen de cientos de microcañones. La distancia pantalla-emisor puede acortarse mucho: el espesor de una pantalla FED, incluidos los circuitos de control es de unos ¡2 mm! Además, la imagen puede observarse con nitidez desde cualquier ángulo. Dado que no hay que barrer los puntos de la pantalla uno a uno, la imagen se forma simultáneamente sobre todos los píxeles y se evitan parpadeos. Se trata, asimismo, de pantallas menos sensibles a cambios térmicos, capaces de funcionar en condiciones extremas y a la intemperie. Aunque ya se comercializan pantallas FED de cinco pulgadas para mostrar datos en sistemas de pequeño formato, el gran reto es conseguir pantallas de grandes dimensiones, necesarias para visualizar televisión en el formato de alta definición.

Hemos descrito aplicaciones que afectarán a nuestra vida cotidiana o proporcionarán nuevas herramientas y métodos de análisis a los científicos. Pero existen aplicaciones más específicas. Por ejemplo, en el desarrollo de nuevos propulsores para vehículos espaciales. Ya en los años sesenta, V. E. Kron propuso utilizar una micropunta con una pequeña perforación (similar a un volcán) como inyector de iones de metales líquidos. El campo intenso en la punta del inyector ioniza las gotitas del metal líquido que ascienden por el tubo interior y salen repelidas a gran velocidad. El principio de acción y reacción se encarga del resto. Aunque los impulsos conseguidos puedan parecer muy pequeños hay que recordar que en maniobras de reorientación y control de altitud de satélites las fuerzas involucradas son diminutas. Las dificultades técnicas de fabricación de estos microvolcanes, causa de su freno, podrían superarse con la integración de miles de micropropulsores que actúan de forma simultánea.

Dentro del ámbito espacial, el estudio de la emisión de campo se revela como fundamental para evitar la emisión descontrolada de partículas cargadas dentro del satélite cuando éste navega entre campos electromagnéticos intensos. Es decir, en muchos casos se debe estudiar la emisión de campo para evitar sus nocivos efectos cuando aparece sin control.

A lo largo del artículo hemos repasado algunas aplicaciones recientes del efecto de emisión por campo. La mayoría son factibles gracias al desarrollo de la microelectrónica de vacío, que ha permitido el resurgir de viejos conceptos ahora plasmados en dispositivos de escala micrométrica. Este renacer modificará muchos aspectos de las técnicas microscópicas ahora existentes; al replantear la fabricación de dispositivos electrónicos, se estimulará el desarrollo de sensores más pequeños, de televisores ultraplanos, etcétera. Podemos citar aplicaciones biomédicas, en el mundo de la automoción o de la telefonía. Además ha incentivado la búsqueda de nuevos materiales que se empleen como emisores electrónicos o sirvan para detectar electrones de energías más bajas.

Bibliografía complementaria

FIELD EMISSION AND FIELD IONIZATION. R. Gomer. Harvard University Press, Cambridge, 1961.

RECENT PROGRESS IN FIELD EMITTER ARRAY DEVELOPMENT FOR HIGH PERFORMANCE APPLICATIONS. Dorothea Temple, en *Materials Science and Engineering Reports*, vol. R24, n.º 5; 1999.

Información sobre los grupos que trabajan en el área de la emisión de campo puede encontrarse en http://www.cmp-cientifica.com/eurofe.



Petróleo y ecología

Bajo la mayor reserva natural de las costas estadounidenses se esconde un extenso yacimiento petrolífero. Compete a la ciencia ponderar los beneficios económicos y las amenazas que comporta su explotación

W. Wayt Gibbs

Volando rumbo oeste desde Deadhorse, Alaska, hacia la nueva explotación de Phillips Petroleum en Alpine, desfila a nuestros pies, como una secuencia de imágenes congeladas en el tiempo, la evolución de la explotación petrolífera en la Cadena Norte. Al despegar, ocupa toda la escena el yacimiento de mamuts donde todo empezó: Prudhoe Bay, descubierto en 1968 y que desde 1977 envía crudo, por el oleoducto Trans-Alaska, hasta el puerto libre de hielos de Valdez.

Ascendiendo a mayor altura se divisa en dirección oeste el sinuoso trazado del oleoducto a Kuparuk, cuya riqueza sólo Prudhoe la supera. Kuparuk ha crecido desde su apertura en 1981 hasta convertirse en una maraña de pozos sobre plataformas de grava diseminados en más de 2000 kilómetros cuadrados y ligados por una red de carreteras y conducciones a gigantescas plantas de refinamiento, edificios de acampada, parques de vehículos y oscuros pozos llenos de rocas y lodos extraídos del fondo.

Hacia el norte, se destacan muy próximas a la costa las islas artificiales de Northstar y Endicott. Y al aterrizar en la pista de Alpine irrumpimos en la vanguardia técnica de la ingeniería del petróleo. Los directivos de esta industria suelen tomar este proyecto de 38 hectáreas como modelo de desarrollo responsable, demostrando que las compañías han aprendido a coexistir con los delicados ecosistemas del Artico.

Alpine es el yacimiento más moderno y más occidental de la Cadena Norte, pero no lo será por mucho tiempo. Cuando abrió sus válvulas en noviembre de 2000, el crudo recorrió unos 80 kilómetros hasta la estación de bombeo 1, cerca de Deadhorse —donde también afluye todo el petróleo producido en la Cadena Norte—, a través de un nuevo ramal del sistema de oleoducto. La producción de Alpine roza los 90.000 barriles diarios.

Pero la conducción a Deadhorse admite mucho más. Se construyó con miras al futuro inmediato de la industria de hidrocarburos de la Cadena Norte, que contempla tres direcciones. Primeramente al oeste, hacia la Reserva Nacional de Petróleo de Alaska (NPR-A), de 9,3 millones de hectáreas, con la que limita Alpine. El gobierno federal puso en arriendo 1,62 millones de hectáreas en 1999, y la exploración se inició el año pasado. Pronto habrá nuevos yacimientos que envíen crudo por la conducción de Alpine.

Debate: *Petróleo o Vida Salvaje*

- El Decreto S. 389 del Senado abriría al desarrollo petrolero la llanura costera y las pendientes montuosas del Refugio Nacional de Vida Salvaje del Artico, la llamada Zona 1002. Contra él compite el decreto S. 411, que designaría la zona como reserva natural, prohibiendo su desarrollo.
- Los geólogos han utilizado datos sísmicos de 1985 para estimar la cantidad de crudo y de gas aprovechable que subyace bajo el suelo. Pero antes de cualquier decisión sobre compra o arriendo, las compañías petroleras emprenderían nuevas prospecciones sísmicas, que dejarían una retícula de desgarros visibles en la vegetación de la llanura, aunque tendrían un efecto escaso o nulo sobre la vida salvaje.
- A esto seguirían calzadas de hielo y pozos de prospección. La ictiofauna y las aves acuáticas pueden verse afectadas si se extrae demasiada agua de ríos y lagos.
- La extracción del crudo utilizaría una red de campos petrolíferos, plantas de tratamiento y oleoductos. Si en el desarrollo se prescinde casi por completo de carreteras, los efectos sobre la manada de 130.000 caribús que crían en la llanura pueden ser poco importantes. Si no es así, puede desalojar los animales, hacer empeorar su nutrición, tasas de predación y de nacimientos, y a largo plazo limitar el crecimiento de su población.



El futuro también puede apuntar hacia el sur. La subida de los precios del gas impulsó a las compañías asentadas en la Cadena Norte a invertir cerca de 14.000 millones de pesetas en un oleoducto de gas natural cuyo coste alcanzaría 1,8 billones de pesetas y que a finales de la década podría ofrecer 991 millardos de metros cúbicos de reservas todavía intactas a los estados de la Unión situados al sur.

Después de 2010, Phillips, BP y otros productores de petróleo de Alaska buscarán nuevas oportunidades en el este. A menos de 50 kilómetros de Badami, terminal oriental de la infraestructura de la Cadena Norte, se extiende la llanura costera y la tundra montuosa denominada Zona 1002, llamada así por la sección de la Ley de Conservación de las Tierras de Interés Nacional de Alaska de 1980, que reservó 600.000 hectáreas de propiedad federal atendiendo a las sospechas de que la región encierra millardos de barriles de crudo y de metros cúbicos de gas.

Esa misma ley colocó la Zona 1002 dentro del Refugio Natural Nacional del Artico (siglas en inglés, ANWR), atendiendo a las observaciones de biólogos sobre la idoneidad de la planicie costera como hábitat privilegiado para la vida del Artico: terrenos donde paren las manadas de caribús, humedales para que aniden los cisnes de la tundra y otras aves acuáticas migratorias, guaridas para osos polares y zorros árticos, y pasto permanente para una pequeña manada de bueyes almizcleros.

El 26 de febrero, el senador por Alaska Frank H. Murkowski promulgó el decreto S. 389, que permitiría la exploración y producción de crudo y de gas en la Zona 1002. El decreto autoriza a la Oficina de Gestión Territorial a restringir las actividades con el fin de garantizar que "no produzcan efectos adversos apreciables en la ictiofauna y otras especies, en su hábitat y recursos de subsistencia y en el ambiente".

¿Pueden evitar tales efectos unas minuciosas disposiciones legales? ¿O por el contrario hasta el más contenido, tecnificado y rigurosamente vigilado desarrollo petrolero supone un riesgo inaceptable para la mayor reserva de fauna silvestre en Norteamérica que se mantiene prácticamente intacta?

Es un error obligar a los científicos a ponderar los valores relativos del petróleo y de la ecología. El pasado noviembre, unos 245 biólogos que no esperaban ser consultados firmaron una carta abierta al presidente Clinton instándole a prescindir del Congreso y declarar reserva natural toda la zona, que así quedaría excluida del desarrollo. Por otra parte, entrevistados numerosos petrólogos de Alaska, aseguraron casi todos que podría asentarse allí la industria petrolera con daños muy superficiales solamente. En una controversia esencialmente política, no debe concederse un valor especial a las opiniones de los científicos.

Pero la ciencia y la ingeniería tienen que entrar en el debate sobre el destino final del Refugio del Artico, y no como grupo de presión sino como fuente de realidades que deben admitir todas las posiciones implicadas. Al cabo de treinta años de innovaciones hay ya procedimientos más respetuosos con el en-



1. **EL REFUGIO DEL ARTICO ofrece un valioso terreno de crianza para el caribú. Los ecólogos sostienen que también tiene un valor intrínseco como "zona de control" con la que poder comparar los efectos del desarrollo humano en el entorno.**

torno para extraer crudo del subsuelo de la tundra. Y los progresos de la biología en 25 años permiten cuantificar las alteraciones de la vida en la superficie que originan tales actividades.

Subsuelo

Al menos ocho grupos distintos de geólogos se aprestaron en el pasado a predecir cuánto petróleo y gas natural yace bajo la Zona 1002. Los ocho equipos se apoyaron en un conjunto de datos obtenido de un examen sísmico realizado en los inviernos de 1984 y 1985. Se enterraron en la nieve largas hileras de micrófonos de baja frecuencia para captar los ecos de sonidos que generaban camiones a distancias de hasta dos kilómetros y se reflejaban en capas rocosas de diversa profundidad. La cadena de micrófonos se fue desplazando y repitiendo el proceso, hasta obtener 2330 kilómetros de instantáneas transversales que cubrían toda la Zona 1002 en cuadrículas de aproximadamente cinco por diez kilómetros.

La conversión de los datos tomados en imágenes del subsuelo y la consiguiente deducción de cuáles son las formaciones existentes y cuánto petróleo encierran tiene tanto de arte como de ciencia. Como explica Mark Myers, del Departamento de Recursos Naturales de Alaska, "la estimación de las rocas originarias, las formaciones que atrapan bolsas de crudo y sus desplazamientos tiene que apoyarse en analogías y experiencias anteriores". Lesley Wallace, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, señala más incógnitas: el tamaño, el espesor y la porosidad de la formación, asignando a cada una de ellas una barra de error, cuya magnitud puede ser grande aunque en todo caso subjetiva.

No es de extrañar, pues, que los ocho estudios mencionados condujeran a estimaciones divergentes, que era inútil comparar dadas las diferencias en los métodos empleados. Por todos los conceptos, la mejor evaluación hasta hoy ha sido la última, dirigida por Kenneth Bird, del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. (USGS). Entre 1996 y 1998, Bird y su equipo procesaron los datos sísmicos antiguos en nuevos modelos informáticos. Reunieron así registros y muestras de rocas de 41 pozos perforados año tras año cerca de los límites del Refugio. Examinaron de nuevo las rocas manchadas de petróleo que afloraban a través del permafrost y viajaron a las montañas vecinas en las que quedaban al descubierto estratos de posibles embalsamientos de crudo. También examinaron la reflectancia de la vitrinita y las trazas dejadas por núcleos radiactivos sobre la apatita hallada en la Zona 1002, buscando pistas sobre la historia térmica de estos minerales, que es importante porque la transformación de los hidrocarburos en petróleo necesita precisamente este proceso de cocción.

Resultan de ahí varias estimaciones, puesto que el valor relevante no es la cantidad de petróleo existente sino la que puede extraerse de manera rentable, lo que a su vez depende del precio del crudo. El equipo de Bird llegó a la conclusión de que una prospección completa daría casi con seguridad unos 7 bbo ("billions of barrels of oil", millardos de barriles de crudo) económicamente aprovechables si los



Modelo de campo petrolífero

La extracción de crudo del Refugio del Artico probablemente requeriría al menos cuatro campos petrolíferos. Habría que remolcar plantas de tratamiento, fraccionadas en **módulos de 1500 toneladas (1),** sobre **calzadas de hielo (2)** construidas con agua extraída de los lagos próximos y esparcida sobre la helada tundra. En cada plataforma de grava de 2,10 metros de espesor, en verano sólo accesible por aire, se situarían hasta 60 cabeceras de perforación muy juntas. Utilizando torres de sondeo de 50 metros de altura o **equipos más pequeños de perforación entubada (3)**, los pozos atravesarían el permafrost para luego desviarse y llegar en horizontal a bolsas de petróleo que pueden distar hasta diez kilómetros. Inyectando agua de mar o gas natural en las rocas al menos por la mitad de los pozos se desplazaría el crudo hacia los pozos productores de las inmediaciones. Una planta de tratamiento centralizada eliminaría el agua y el gas del crudo procedente de campos satélites, a veces alejados 50 kilómetros; después, bombearía el crudo por un oleoducto hacia Prudhoe. Este oleoducto cruzaría los ríos por debajo y se alzaría un metro y medio sobre la tundra para dejar paso a caribús y bueyes almizcleros. Unos **“bucles” a separaciones regulares (4)** detendrían automáticamente el paso de crudo si se produjera una fuga importante. Durante todo el año atenderían la instalación unas 300 personas.

En invierno, grandes caravanas de unos 100 trabajadores, ocho a diez **camiones vibradores (5)** y tres docenas de otros vehículos cruzarían en todas direcciones la helada tundra, realizando pruebas sísmicas. Otros equipos de dotación semejante formarían las plataformas de hielo, trasladarían a ellas torres de perforación móviles de 800 toneladas y perforarían después a toda prisa **pozos al azar (6)** antes del deshielo primaveral.

precios de la Cadena Norte se mantienen por encima de 24 dólares el barril.

Con una producción de 7 bbo, la Zona 1002 daría alrededor de la mitad de crudo aprovechable que Prudhoe Bay en 1977. Pero, como sucedió en aquel caso, el crudo sólo pudo obtenerse al cabo de varios decenios, siguiendo una clásica curva de campana. Probablemente transcurran diez años entre la decisión de abrir el Refugio al desarrollo y la primera aportación de crudo al oleoducto de Alaska. Si se toma la NPR-A como referencia, se tardará dos años en estudiar y discutir el impacto ambiental. Las compañías tendrán luego de uno a dos años para efectuar pruebas sísmicas más rigurosas y preparar sus ofertas de arriendo. Cada descubrimiento suele implicar varios años de prospección. Todo lugar de perforación, instalación de tratamiento y prolongación de oleoducto de carácter permanente habrá de superar análisis y objeciones legales, y cada uno de ellos necesitará dos o tres años para equiparse.

La Administración de Información de la Energía de EE.UU. (EIA) sugiere que, si la estimación del USGS en 7 bbo es correcta, la Zona 1002 producirá algo menos de 200.000 barriles al día durante los cinco primeros años. La EIA predice asimismo que el consumo de crudo en los Estados Unidos, cifrado en 19,5 millones de barriles/día en el año 2000, crecerá en 2010 hasta 23 millones, en un 66 por ciento importados. La producción máxima de la llanura costera del Refugio del Artico en su total desarrollo alcanzaría, probablemente no antes de 2030, una cota cercana a un millón de barriles/día. La Zona 1002 proporcionaría entonces un modesto 4 por ciento de la demanda nacional de petróleo.

Primeros impactos

Los petrólogos saben que es preciso reducir la gran inseguridad del análisis del USGS. Según Myers, debería realizarse un nuevo reconocimiento sísmico en tres dimensiones. En el examen de 1985 los datos sísmicos estaban espaciados hasta en diez kilómetros, con lo que cualquier prospección perforada este año sería invisible en aquel sistema. Para Michael Faust, director de técnicas geológicas de Phillips en Anchorage, la cuadrícula debe ser esta vez mucho más fina, con líneas separadas unos 350 metros. Introduciendo nuevos datos, de alta resolución, en supercomputadores se podrían elaborar modelos tridimensionales del subsuelo.

De todos modos, la caravana del equipo de prospección se parecería mucho a la antigua. Típicamente podría comprender ocho vehículos vibradores y siete vehículos registradores, acompañados por transportes de personas, camiones mecánicos, camiones tienda, camiones cisterna, una incineradora, más una dotación de 80 a 120 personas y un tren de acampada de 20 a 25 contenedores sobre esquís, arrastrado por varios tractores oruga con ruedas estriadas. La caravana partiría en enero y volvería en abril, regresando el próximo invierno si fuera necesario para cubrir en su totalidad la Zona 1002, a 350 metros cada vez. Cada compañía o asociación petrolera interesada realizaría su prospección completa, con su propia caravana.

Esta perspectiva preocupa a Martha Raynolds, bióloga de la Universidad de Alaska. En compañía de Janet Jorgenson, botánica del Servicio de Fauna Silvestre e Ictiológica de Fairbanks, ha visitado por seis veces 200 parcelas de tundra elegidas aleatoriamente para analizar el impacto del último paso de vehículos sísmicos sobre ellas, hace 17 años. El diez por ciento todavía presentaba deterioros o reducción de su cobertura vegetal al cabo de 10 años, y el siete por ciento —cerca de 160 kilómetros de pista— no se habían recuperado en 1998.

El problema, según ellas, está en el terreno. Los neumáticos anchos, de baja presión, dejan poca huella en las praderas llanas, heladas y cubiertas de nieve que circundan Prudhoe Bay y Alpine. Los neumáticos estriados de los tractores se agarran allí bastante bien. Pero en dirección este, hacia la ANWR, las montañas avanzan al norte y la costa se retira, con lo que la Cadena Norte penetra 40 o 50 kilómetros en la Zona 1002, y lo típico es que descienda suavemente desde las ondulantes colinas hacia la llanura surcada por arroyos y hasta los hielos del mar de Beaufort. A menudo esto no es así, la tundra se apila en mogotes, y el viento barre la nieve que los cubre dejando al descubierto sauces enanos y vegetación muerta persistente. Las ruedas y los esquís aplastan los arbustos y compactan las hierbas. Los neumáticos pierden tracción en las pendientes y son reemplazados por ruedas de acero, que inevitablemente se hincan en el suelo.

Al principio de mayo, el permafrost que subyace bajo las zonas aplastadas se deshiela prematuramente, privado de su aislamiento habitual. Se forman lagunas, ciertas especies vegetales endémicas mueren y otras colonizadoras toman su lugar. Las tres cuartas partes de los destrozos de la vegetación son visibles desde el aire a los diez años de la prospección, y muchos de ellos resultan permanentes. Con todo, la investigación no sugiere que tales cambios ejercen efectos negativos sobre la vida salvaje.

Gasto de agua

Los reconocimientos sísmicos dan indicios; no descubren nada. Para un petrólogo la única verdad es la que brota de hoyos excavados en la tierra. En cuanto los supercomputadores hayan regurgitado sus tandas de imágenes, las brigadas de prospección se desplegarán por la helada Zona 1002 para perforar pozos por todas partes. Una torre de perforación móvil como la de Alpine pesa un millón de kilogramos, y tiene que trasladarse y estacionarse sobre losas de hielo de 15 centímetros de espesor, formadas por pilas de láminas de hielo aglutinadas con agua.

Y el gasto de agua es enorme, unos 2,4 millones de litros por kilómetro de trayecto. En torno de Prudhoe hay decenas de miles de lagos que aseguran el suministro de agua líquida, aunque la temperatura del aire baje hasta –30 ºC. Doce años atrás, sin embargo,

una exploración exhaustiva de la Zona 1002 en abril —cuando el hielo alcanza su máximo espesor de 2,20 metros— sólo descubrió 34 millones de litros de agua líquida embolsada en cavidades del hielo a lo largo de 380 kilómetros de los principales ríos del interior. Dentro de la Zona 1002, Steve Lyons, jefe de hidrología del Refugio, localizó 255 lagos, lagunas y pozas; sólo 59 con más de 2,20 metros de profundidad y ocho de ellos con agua deshelada suficiente para construir al menos 1,6 kilómetros de calzada helada. Los lagos mayores se sitúan en los deltas de los ríos Canning y Jago, y en su fondo suele haber agua salobre, potencialmente tóxica para la vegetación.

Según Lyons, si los escasos lagos líquidos se dejan congelar totalmente en invierno, al verano siguiente las aves migratorias que se alimentan de invertebrados en esas aguas tendrán muy poco que comer. Advierte también que una extracción excesiva del río Canning, que brota de manantial y corre libremente todo el año, dañaría la ictiofauna que pasa allí el invierno.

"El agua en la ANWR podría crear un problema", afirma Thomas Manson, responsable ambiental en Alpine, que trata y recicla su agua dulce, a pesar de lo cual consume 265.000 litros diarios. La dificultad no estriba sólo en la cantidad, sino también en la distribución: como norma no se trae agua desde más de 16 kilómetros del lugar en que se necesita, so pena de que se congele en los camiones que la transportan. Lyons admite que habría soluciones técnicas, como sería enlazar una planta desalinizadora a un oleoducto aéreo calentado. Pero tales medidas alterarían la economía del proyecto y por tanto la calidad del crudo extraíble.

La vida

Si se quiere extraer petróleo, habrá que construir instalaciones adecuadas. "Si se ubican en la ANWR cuatro o cinco explotaciones del tamaño de Alpine con sus instalaciones de tratamiento auxiliares, estaremos hablando de mil o más hectáreas de desarrollo", señala Myers. "Es evidente que parte del hábitat se dañará o será destruido. La cuestión es saber cómo va a incidir esto en el comportamiento de los animales."

En teoría, el desarrollo petrolero puede afectar de muchas maneras a los animales. Es cierto que los residuos de la perforación y las basuras ya no se entierran en pozos superficiales, sino que se incineran o se inyectan en pozos muy profundos, lo que reduce grandemente los perjuicios a zorros y osos. Pero hay otras emisiones contaminantes. Alpine contempla el paso de seis a ocho aviones al día. Flotan constantemente sobre la tundra los olores que despiden hasta 700 trabajadores y el ruido de numerosos camiones y de dos turbinas poderosas. Una llama de gas de 30 metros arde sobre una chimenea de 300 metros de altura. Y tres canalizaciones —dos para introducir agua de mar y gasóleo y otra para extraer el crudo— se extienden hacia el horizonte a una altura que casi roza las astas de un caribú.

¿Cómo reaccionarán los pobladores animales de la Zona 1002? La biología sólo puede hallar piezas sueltas de este inmenso rompecabezas. Parece que los campos de Prudhoe y Kuparuk han hecho retroceder la fauna silvestre en sus cercanías. Los cisnes de la tundra, por ejemplo, ya hacen sus nidos a más de 200 metros de las calzadas de paso, y los caribús con sus crías se han alejado a 4 kilómetros como mínimo.

Brad Griffith, del Instituto de Biología del Artico de la Universidad de Alaska, descubrió recientemente dos características importantes en la distribución desde 1985 de los 130.000 caribús, que llegan a la zona por junio para parir y destetar a sus crías antes de emigrar hacia climas más cálidos a mediados de julio. La primera particularidad es que existe una estrecha correlación entre la supervivencia de las crías y la cantidad de alimento rico en proteínas que contenga el terreno de crianza. La segunda es que las hembras de caribú con crías en lactancia se concentran invariablemente allí donde más deprisa crece la hierba (según se comprueba desde satélites). Scott Wolfe demostró el año pasado que la segunda característica también es aplicable a la mitad de la manada del Artico Central, que cría al este del Río Sagavanirktok.

Cruzando ese río se encuentran las grandes explotaciones petrolíferas, y Wolfe constató que de 1987 a 1995 la mitad occidental de la manada se había desplazado hacia el sur buscando nuevos terrenos de parida, alejándose del desarrollo expansivo y de pastos más abundantes. Otro biólogo del Instituto, Ray Cameron, teme que esa migración pueda afectar al número de caribús en suficiente medida para ser perceptible por encima de las fluctuaciones normales producidas por los ciclos del clima, los insectos y muchos otros factores. Todavía no ha ocurrido esto: la manada del Artico Central —27.000 cabezas— es cinco veces mayor que en 1978.

Pero en 1995 un estudio de Cameron y otros demostró que una bajada de 9 kilogramos en el peso de la madre podría reducir su fecundidad en un 30 por ciento, y en un 20 por ciento la supervivencia de la

Hechos: *Predicción del flujo*

- El desarrollo pleno de la Zona 1002 produciría casi con certeza cerca de siete millardos de barriles aprovechables, según estudio del USGS en 1998, pero solamente si los precios del crudo de la Cadena Norte se mantienen por encima de los 24 dólares por barril.
- La producción de crudo alcanzaría hacia 2030 un máximo de un millón de barriles diarios —apenas el 4 por ciento del consumo diario de los EE.UU.— según el USGS.
- El USGS estima que la Zona 1002 probablemente contiene alrededor de 113 millardos de metros cúbicos de gas natural. La producción de gas exigiría construir un nuevo oleoducto para conectar la Cadena Norte a los 48 estados de la Unión situados al sur.



2. LA CONSTRUCCION DE CAMPOS PETROLIFEROS semejantes al nuevo de Alpine podría iniciarse de aquí a seis años en el Refugio del Artico, si el Congreso aprueba un decreto dentro de ese plazo. En cada campo se perforarían al menos 60 pozos que traerían petróleo de distancias de hasta diez kilómetros.

cría. El seguimiento de hembras provistas de radiotransmisores demostró que parían el 23 por ciento menos crías las que pastaban entre los campos petrolíferos que sus congéneres al este del río. Pero falta un eslabón esencial en esta cadena lógica: la prueba de que el caribú, sacado de sus pastos preferidos, no halle suficiente comida.

El caribú de la ANWR podría sufrir más que los del Artico Central, porque allá pastan casi cinco veces más animales en una superficie que es la quinta parte de la llanura que circunda Prudhoe y Kuparuk. Al tener menos opciones, una fracción mayor de las hembras podría perder peso y parir menor número de crías. Los campos de petróleo provocarían su huida a las colinas, donde los jóvenes están más expuestos a ser presa de águilas, lobos u osos. Recientemente Griffith y sus colegas combinaron en un modelo informático imágenes tomadas por satélite con datos de la Zona 1002 sobre cría de caribús y seguimiento de osos grises. El resultado predice que el desplazamiento de los terrenos de cría hacia las estribaciones de la montaña reducirá en un 14 por ciento la tasa de supervivencia de las crías.

Patricia Reynolds, bióloga del Servicio de Fauna Silvestre e Ictiológica que vigila los 250 bueyes almizcleros que habitan la Zona 1002, indica que estos animales sobreviven a los terribles inviernos de la llanura porque se mueven poco y conservan la grasa almacenada. Si durante los trabajos se extrae grava de las orillas de los ríos donde residen, estas reses saldrán huyendo, trastornando un balance energético de por sí precario y poniendo en peligro su descendencia.

Por otra parte, si las plataformas de perforación están atendidas por cortas pistas de aterrizaje en lugar de largas redes de carreteras, tal vez el caribú se asuste menos y sus desplazamientos sean menores. Ya no es necesario situar los pozos directamente sobre la bolsa de crudo, por lo que las plataformas podrían ubicarse respetando los macizos de juncia más nutritivos. Muchos de los bueyes almizcleros llevan collares transmisores, y es posible tomar precauciones para no tropezarse con ellos.

Bibliografía complementaria

INFORME ESPECIAL: ¿SE ESTÁ AGOTANDO EL PETRÓLEO?, en *Investigación y Ciencia*, mayo de 1998, págs. 65-83.

THE OIL AND GAS RESOURCE POTENTIAL OF THE ARCTIC NATIONAL WILDLIFE REFUGE 1002 AREA, ALASKA. Open File Report 98-34 del USGS, 1999.

THE NATURAL HISTORY OF AN ARCTIC OIL FIELD. Preparado por Joe C. Truett y Stephen R. Johnson. Academic Press, 2000.

Priones y encefalopatía espongiforme bovina

Los tests actuales revelan si un animal sacrificado padecía la enfermedad de las vacas locas en un grado avanzado, pero distan mucho de poder asegurar que una pieza de carne adquirida en el comercio está exenta de peligro. En los nuevos tests basados en los mecanismos y en la velocidad de reproducción de los agentes causales de la encefalopatía espongiforme bovina y de otros priones infecciosos podría hallarse la solución

Manfred Eigen

Desde que apareció en Europa el primer caso de enfermedad de las vacas locas reina una gran inquietud entre la población. La encefalopatía espongiforme bovina (EEB) ocupa portadas de periódicos y revistas. La patología debe su nombre a la degeneración que en forma de esponja aparece en el sistema nervioso central en las vacas que sufren el estadio final de la enfermedad.

Por lo que sabemos, la EEB puede trasmitirse también a las personas y, después de un período de incubación de uno a varios años, provocar una nueva variedad de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, que termina en una demencia progresiva y en la muerte. (La genuina enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, conocida desde hace tiempo, sigue el mismo curso, pero no es contagiosa. Surge espontánea, sin intervención de factores externos, con una probabilidad sumamente escasa.)

¿Qué riesgo hay de infectarse? ¿Qué se puede comer sin peligro? ¿Hasta qué punto son seguros los tests utilizados para detectar la enfermedad? ¿Cuánto dura el período de incubación en las vacas y en las personas? Se trata de preguntas inquietantes a las que no podemos ofrecer respuestas definitivas y exactas, por una razón poderosa: nos faltan datos sobre la multiplicación del agente causal de la enfermedad de las vacas locas. Desconocemos cómo se originan los síntomas característicos. Para entender el mecanismo de infección de la EEB y sus efectos resulta indispensable poner en claro la cinética de los procesos moleculares subyacentes. Sólo así podremos encontrar medidas eficaces para paliar la epidemia.

En un artículo que publiqué en 1996 analizaba las distintas hipótesis sobre la multiplicación del agente causal de la EEB y de otros "priones" para determinar su relación con el curso clínico y los conocimientos adquiridos sobre la difusión de la epidemia. Los nuevos hallazgos confirman las conclusiones a que llegaba en dicho trabajo. Entretanto, basándose en aquellas conclusiones, se ha desarrollado un modelo molecular que ha servido de fundamento para un nuevo test de detección de agentes infecciosos; la prueba permite demostrar la presencia de priones de la EEB en unas concentraciones de diez a cien veces inferiores a las que se necesitan con los métodos estándar actuales. Se podrá así diagnosticar la enfermedad de las vacas locas en una fase precoz. En cualquier caso, seguirá necesitándose un test mucho más sensible para poder asegurar que una determinada pieza de carne de ternera se puede consumir sin peligro, es decir, para garantizar que contiene menos priones peligrosos de los requeridos para transmitir la enfermedad.

¿Qué es un prion?

A Stanley Prusiner, de la Universidad de California en San Francisco, le corresponde el mérito, galardonado con el Nobel de química en 1997, de haber demostrado que una proteína era el agente infeccioso de la EEB y enfermedades afines. Comprobó la presencia en todos los organismos sanos de una proteína con una secuencia de aminoácidos siempre idéntica cuya función era hasta entonces desconocida. La llamó prion. Hoy se habla de proteína priónica



(PrP) y se especifica su forma celular normal con el sufijo "c" (inicial de 'célula'); en cambio, el sufijo "sc" designa la variante patológica infecciosa. Deriva el sufijo "sc" de la enfermedad epidémica mortal conocida desde hace tiempo en las ovejas con el nombre de *scrapie*; en ésta, y a principios de los años ochenta, Prusiner centró sus investigaciones, cuando todavía se desconocía la EEB. La PrP^{c} difiere de la PrP^{sc} sólo en su estructura espacial, esto es, en el plegamiento de la cadena de aminoácidos.

Una molécula de PrP^{sc} sola no es infecciosa. La "unidad infecciosa", es decir, la cantidad mínima de moléculas que puede desencadenar la infección, comprende al menos 100.000 moléculas de PrP^{sc}. Ha quedado ello demostrado en experimentos en los que se inyectaron diferentes cantidades de PrP^{sc} en animales, observando luego cuántos de cada grupo del ensayo enfermaban al cabo de determinado tiempo.

Una de las demostraciones más convincentes a favor de la hipótesis de Prusiner sobre la instauración de las enfermedades por priones la aportaron Charles Weissmann y su equipo, de la Universidad de Zurich. Revelaron que en ratones a los que se les había eliminado el gen *PrP*, impidiendo en consecuencia la síntesis de la proteína PrP^{c}, no producía ningún efecto la infección con PrP^{sc}.

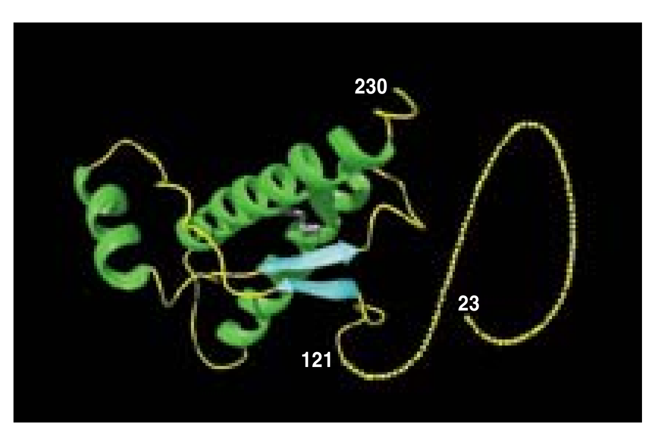
La demostración cuantitativa de que, de acuerdo con la hipótesis de Prusiner, los priones no contienen material hereditario en forma de ácidos nucleicos fue lograda por Detlev Riesner, de la Universidad de Düsseldorf. A través de mediciones fisicoquímicas extraordinariamente sensibles excluyó la presencia de

ARN o de ADN en los agentes causales de enfermedades como la EEB. Basándose en los límites de detección que presenta el método de Riesner puede excluirse que las unidades infecciosas de PrP^{sc} tengan más de una molécula de ácido nucleico de una longitud máxima de 100 nucleótidos; esto es en todo caso insuficiente para codificar la proteína priónica.

Lo anterior nos lleva a una afirmación importante: la EEB y otras enfermedades por priones son "infecciosas" en el sentido de que su agente causal se reproduce exponencialmente. Hasta ahora todas las enfermedades infecciosas se atribuían a agentes "reproducibles", en cuya base se halla la duplicación del sustrato hereditario, representado por ARN o ADN. No es el caso en los priones. Sin embargo, tal descubrimiento no echa por tierra los conocimientos de la virología y la bacteriología. Lo único que demuestra es que hay sistemas constituidos exclusivamente por proteínas que "simulan" el comportamiento de replicación típico de los ácidos nucleicos.

A Kurt Wüthrich, del Instituto Politécnico Federal de Zurich, le debemos otro avance en la investigación. Mediante el recurso a la resonancia magnética nuclear (RMN) él y su grupo determinaron la estructura de los priones normales. Estos contendrían un dominio "globular", donde las cadenas de aminoácidos presentan tres estructuras en tirabuzón (helicoidales) unidas. El dominio, como el resto de la molécula, puede ser "digerido" por una proteasa, lo que no es posible para el segmento análogo de la PrP^{sc}. La razón de tal diferencia reside, con probabilidad, en que la variedad patológica presenta menos hélices y más "hojas beta"; en éstas la cadena de aminoácidos conforma un entrelazado parecido a una lámina ondulada. Aquí las enzimas sólo pueden disociar la extremidad abierta de la cadena.

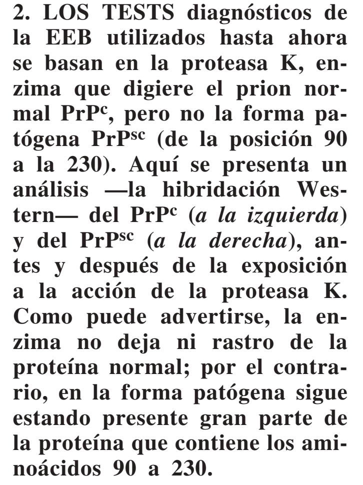
En semejante comportamiento dispar de los PrP^c y de los PrP^{sc} se fundan los tests hoy utilizados para la detección de la EEB. Kurt Wüthrich ha examinado las diferencias estructurales del dominio globular en priones de diversas especies y encontrado ahí la clave para explicar la posible transmisión de la enfermedad. Se ha observado, por ejemplo, que las proteínas priónicas de la vaca y del hombre presentan estructuras muy similares, indicio de una discreta probabilidad de que la epidemia pase de una especie a la otra.



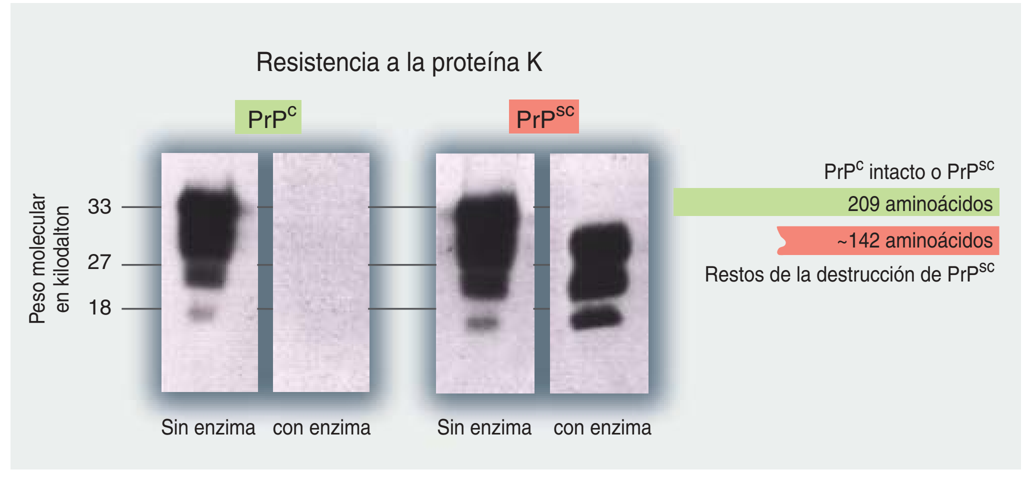
1. ESTRUCTURA DE LA PROTEINA PRIONICA NORMAL. La proteína priónica normal de la vaca (PrP^c) está "plegada" de forma complicada entre los aminoácidos números 121 y 230 mientras que el resto de la molécula (aminoácidos números 23 a 121) forman una cadena libremente fluctuante. La zona plegada contiene tres hélices α enroscadas en forma de sacacorchos (*en verde*) y una pequeña hoja plegable β (*en azul*). Al transformarse en la forma patógena PrP^{sc} esta parte de la molécula adopta una estructura espacial diferente.

Stanley Prusiner propuso también un mecanismo para la transformación de la PrP^c en PrP^{sc}. A tenor del mismo, una molécula de PrP^{sc} se enlazaría con otra de PrP^c y le haría adoptar la forma patológica. Dicho mecanismo correspondería a la autocatálisis directa de una transformación estructural. El agente patógeno actuaría favoreciendo la conversión de la forma inocua en la maligna, procurándose de ese modo su propia reproducción.

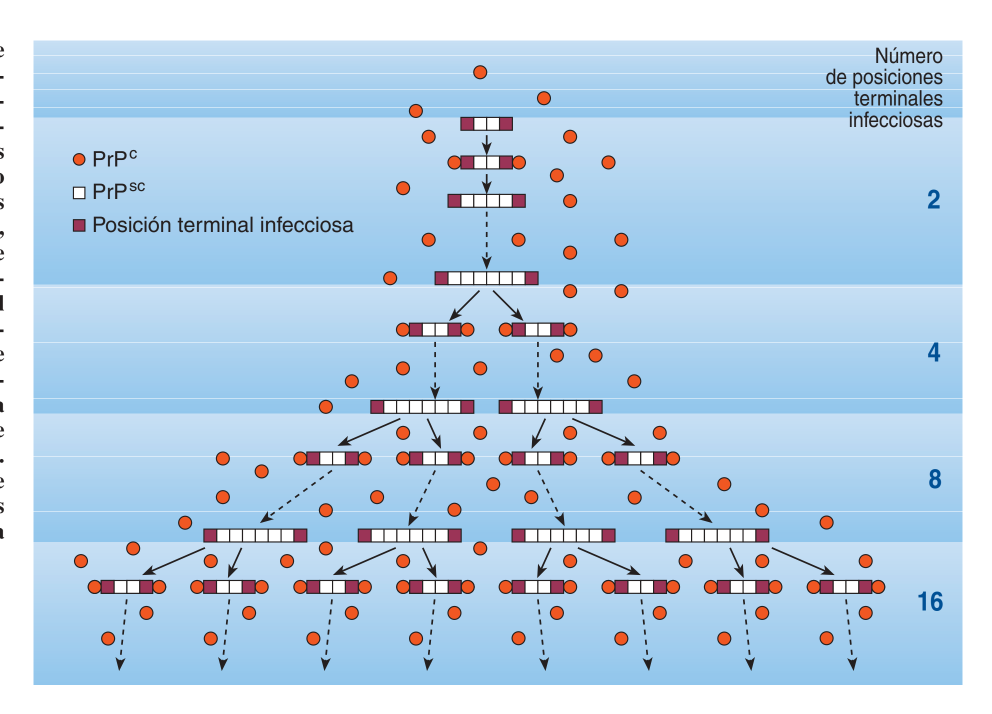
Peter Lansbury, del Brigham and Women's Hospital de Boston, propone, por el contrario, un mecanismo de amplificación de las cadenas en torno a un "germen" de crecimiento. Según Lansbury, la multiplicación de la PrP^{sc} patológica se asemejaría a un proceso de polimerización, similar a la producción de sustancias sintéticas lineales como el polietileno:



2. LOS TESTS diagnósticos de la EEB utilizados hasta ahora se basan en la proteasa K, enzima que digiere el prion normal PrP^c, pero no la forma patógena PrP^{sc} (de la posición 90 a la 230). Aquí se presenta un análisis —la hibridación Western— del PrP^c (*a la izquierda*) y del PrP^{sc} (*a la derecha*), antes y después de la exposición a la acción de la proteasa K. Como puede advertirse, la enzima no deja ni rastro de la proteína normal; por el contrario, en la forma patógena sigue estando presente gran parte de la proteína que contiene los aminoácidos 90 a 230.



3. LA MULTIPLICACION de los priones infecciosos se desarrolla en dos fases. En la primera, las cadenas de PrP^{sc} fijan en sus extremos moléculas de PrP^{c} propias del organismo y las transforman en variantes patógenas. En una segunda fase, las cadenas en crecimiento se fragmentan; su longitud permanece así constante en el tiempo. Mientras que el crecimiento de la cadena no hace aumentar el número de unidades PrP^{sc} infecciosas, la rotura de las cadenas es responsable de su crecimiento exponencial. En este esquema el proceso se representa de forma mucho más regular de lo que ocurre en la realidad.



una cadena de unidades de PrP^{sc} en fila crece con la incorporación, una tras otra, de moléculas de PrP^{c} que van transformándose en la variante patológica. Presuponer la constitución de un germen para el crecimiento de la cadena significa que deba alcanzar una longitud crítica antes de que la incorporación de nuevas unidades se desarrolle a mayor velocidad que la pérdida de las viejas por separación. Con este modelo Lansbury pretende encontrar explicación a dos hechos: que las PrP^{sc} adopten en el cerebro de las víctimas la forma de bastoncitos y que la "unidad infecciosa" comprenda un elevado número de moléculas PrP.

¿Cómo actúa un prion?

En mi trabajo de 1996 me proponía evaluar los dos mecanismos desde el punto de vista de la cinética química. Se comprobó que, si se asumen para las constantes de velocidad y equilibrio valores análogos a los conocidos para las interacciones entre proteínas, el mecanismo de Prusiner con sólo dos unidades priónicas no puede funcionar en la fase catalítica. Aplicado a la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob humana, espontánea, esto significa unas condiciones tan críticas que, dados unos determinados parámetros, la concentración de PrP^{sc} debería ir en aumento constante o en continuo descenso. Valdría en este caso el principio del "todo o nada": la enfermedad debería extinguirse constantemente por sí misma antes de irrumpir, o bien aparecer espontánea con una probabilidad mucho mayor que lo que realmente sucede.

El problema se resuelve cuando se introduce una interacción cooperativa entre más de dos unidades de proteínas. Así dirigen su actividad ciertas enzimas "alostéricas", que sólo adoptan una forma activa mediante la asociación con una molécula efectora. A través de la cooperación, y contando con parámetros cinéticos apropiados, la transformación estructural autocatalítica consiente alcanzar un valor umbral de irrupción de la enfermedad.

El mecanismo de Lansbury sobre formación del germen incluye también una suerte de interacción cooperativa que, en su caso, actúa entre los componentes de la cadena PrP^{sc}. Un solo componente no puede

PUNTOS ESENCIALES

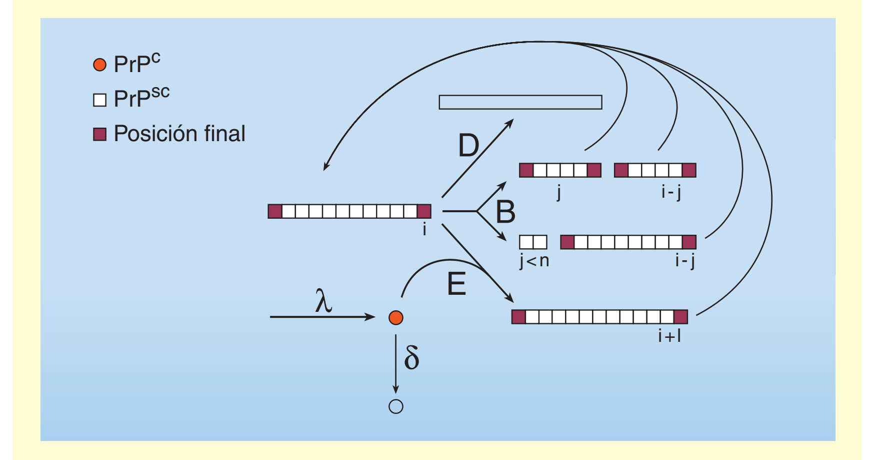
El problema
El agente causal de la EEB tiene un período de incubación largo. Han de pasar varios años desde la infección hasta que aparezca la enfermedad de las vacas locas. Los tests actuales sólo permiten diagnosticar la enfermedad seis meses antes de la aparición de los primeros síntomas. Sin embargo, la vaca ya era probablemente contagiosa desde mucho antes. Por otra parte, los tests actuales sólo pueden aplicarse en animales sacrificados.

Avances a corto plazo
Un nuevo procedimiento diagnóstico, la "espectroscopía de fluorescencia con correlaciones cruzadas", resulta ser de diez a cien veces más sensible que los tests actuales. En principio podría, además, utilizarse en reses vivas. De ese modo podría descubrirse la enfermedad con algunos meses de adelanto.

Solución a largo plazo
El estudio del mecanismo de multiplicación de los priones evidencia la posibilidad de descubrir una EEB desde el comienzo de la infección. La solución estriba en multiplicar *in vitro* las partículas infecciosas, antes de su aparición natural.

CINETICA DE LA MULTIPLICACION

Para dar expresión matemática a la multiplicación de priones infecciosos se han de considerar todas las reacciones que pueden tener lugar en una cadena de moléculas de PrP^{sc} anormalmente plegadas con una longitud *i* y calcular las correspondientes velocidades. Entre las posibles reacciones están la degradación (desintegración) por las defensas inmunitarias o cualquier otra forma de inactivación (*D*). Además, la cadena puede romperse por cualquier sitio (*B*). Unicamente los fragmentos con una determinada longitud mínima (*n*) siguen siendo infecciosos. Por último, la cadena puede prolongarse (*E*) mediante la incorporación de moléculas normales PrP^c y su transformación en la variante patógena. En condiciones normales las moléculas PrP^c se hallan en constante proceso de metabolización γ y descomposición δ.



Para todas estas transformaciones rigen constantes de velocidad específicas. En el siguiente esquema de la reacción figuran los valores de las velocidades de los procesos parciales: *x* representa la concentración de PrP^c normal, *y* el número total de cadenas y *z* el número total de moléculas PrP^{sc} contenidas en ellas.

Velocidad de reacción ($\dot{x} = dx/dt$)	Metabolismo λ/δ		Degradación D	Roturas de la cadena B	Elongación $E(x_0)$	Disociación terminal $n \leq 3$
$\dot{x}$ =	$+\lambda$	$-\delta x_0$			$-E(x_0)y$	$+n(n-1)By$
$\dot{y}$ =			$-Dy$	$+Bz$		$-(2n-1)By$
$\dot{z}$ =			$-Dz$		$+E(x_0)y$	$-(n-1)By$

Estos valores pueden relacionarse mediante ecuaciones diferenciales con los parámetros temporales *y* y *z*. En el marco del estado de equilibrio dinámico la concentración de moléculas PrP^c naturales puede tomarse prácticamente como constante (x_0). Las soluciones de las ecuaciones diferenciales son:

$$y(t) = A_2 e^{+k_2 t} + A_1 e^{-k_1 t}$$
$$z(t) = B_2 e^{+k_2 t} + B_1 e^{-k_1 t}$$

Cada una de las ecuaciones incluye un término de crecimiento y uno de destrucción. Este último tiene una constante temporal negativa ($-k_1$) y describe la instauración de un estado de equilibrio dinámico con una distribución constante de las longitudes de las cadenas. Al cabo de un determinado tiempo domina el término de crecimiento. Estas ecuaciones ponen de manifiesto por qué los priones infecciosos se multiplican con extrema lentitud.

retener y transformar una molécula PrP^c. Para que la transformación se produzca de un modo eficaz deben actuar como mínimo tantos componentes cuantos contiene el núcleo germinal. Sólo entonces la velocidad de crecimiento de la cadena superará la de su destrucción.

Persiste una dificultad. Una vez alcanzado el tamaño de germen, la cadena sigue creciendo de un modo autocatalítico, aunque sin la aceleración exponencial que caracteriza a las reacciones autocatalíticas. Una aceleración exponencial presupone que, después de la transformación, ya sea el catalizador originario o sea el producto de su reacción permanezcan disponibles para ulteriores ciclos autocatalíticos, de suerte que el número de las especies catalíticamente activas se doble en cada tanda de reacciones. Sin embargo, no es eso lo que sucede en una polimerización creciente: en cada paso sólo permanece catalíticamente activa la unidad proteica del extremo de la cadena.

También hay solución para esta dificultad. El mecanismo de polimerización fomenta un crecimiento exponencial siempre que se dé una condición: que las cadenas en elongación se fragmenten de continuo, liberando nuevos catalizadores. Martin Nowak (un compañero de los tiempos en que se investigaban los procesos de evolución molecular en Göttingen y Viena, contratado hoy por el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton) captó la idea de la rotura de la cadena y construyó un delicado modelo. En los últimos años, gracias a la traducción del modelo en una expresión matemática, Joanna Masel, de la Universidad de Oxford, ha aclarado muchos pormenores del decurso de las enfermedades por priones que se resistían a la explicación.

Así se multiplica el agente causal de la EEB

En su modelo, Nowak introdujo ecuaciones que expresan el estado de equilibrio para el crecimiento, la rotura y la disolución de cadenas proteicas de cualquier longitud. En esencia el crecimiento es expresión de la elongación de

El autor

MANFRED EIGEN es director emérito del departamento de cinética bioquímica del Instituto Max Planck de Química Biofísica de Göttingen. En 1967 recibió el premio Nobel de Química por su descubrimiento de métodos innovadores para la medición de la velocidad de reacciones químicas. Abordó luego las bases moleculares de la evolución. Con Rudolf Rigler ha desarrollado un método espectrográfico para poner de manifiesto moléculas individuales.

las cadenas. La elongación y la rotura de la cadena cooperan para que el número de fragmentos terminales de las cadenas catalíticamente activos aumente de forma exponencial. La desintegración, a la que están sometidos todos los polímeros, hace que los núcleos germinales infecciosos tengan una vida limitada.

La velocidad de elongación resulta de tres factores que describen procesos parcialmente en competición:

- la unión de una unidad proteica PrP^c a uno de los dos extremos (o ambos) de la cadena de PrP^{sc}; su velocidad está limitada por la frecuencia de encuentros entre las dos moléculas, función a su vez del movimiento de difusión;
- la separación de la unidad PrP^c antes de que su estructura se transforme;
- la transformación estructural de la PrP^c en PrP^{sc}, cambio del cual depende la integración estable en la cadena; establece la tasa de elongación.

Las velocidades de estos tres procesos, siguiendo el modelo de la cinética enzimática, pueden describirse mediante una expresión matemática. En lugar de construir una ecuación de equilibrio para cada una de las cadenas PrP^{sc}, Nowak utiliza dos términos sumatorios que introduje yo en 1996. Uno incluye las unidades PrP contenidas en las cadenas de polímeros de diversa longitud. El otro es una medida del número de dichas cadenas y, en consecuencia, de todas las posiciones terminales catalíticamente activas.

Esta presentación conjunta tiene la ventaja de compensar muchas expresiones propias de las ecuaciones individuales. Al final quedan sólo dos ecuaciones diferenciales lineales, con resolución analítica, que describen la variación de los dos términos en el curso del tiempo. Las soluciones son el resultado de la suma de dos funciones exponenciales en las que el tiempo figura como exponente una vez con signo positivo y otra con signo negativo.

Una función representa un término de crecimiento; la otra, un término de disminución. Este último describe la situación de equilibrio dinámico en el que se mantiene estacionaria una determinada distribución de longitudes de la cadena con un valor medio establecido. Al cabo de un tiempo, su contribución se torna despreciable y sólo queda activa la porción terminal. Luego crece exponencialmente tanto el número de cadenas poliméricas como el de unidades PrP^{sc} contenidas en ellas, hasta superar la cuota de priones normales.

Período de incubación

Joanna Masel ha desarrollado este modelo, analizando todas sus consecuencias y comparándolas con los datos experimentales. Sus resultados revisten máximo interés para un diagnóstico precoz de las enfermedades por priones. Parece claro que la incorporación de una molécula de PrP^c en una cadena de PrP^{sc} y su transformación en una proteína patológica requiere cerca de un cuarto de segundo. La cadena estable de PrP^{sc} tiene una longitud media de unas mil unidades. En consecuencia, para su formación necesita mil veces más tiempo. Los experimentos indican

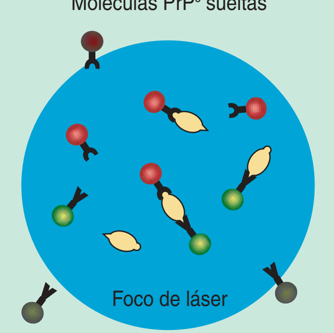
MARCADO CON DOS COLORANTES FLUORESCENTES







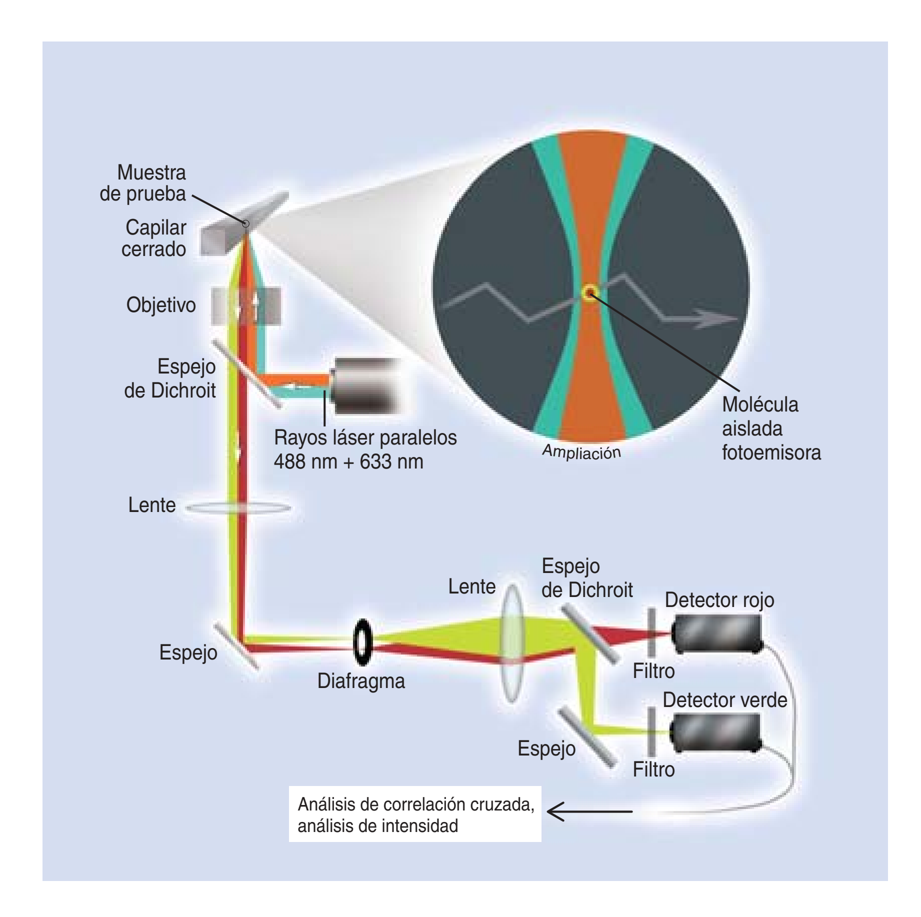




Cadenas de PrP^c

Foco de láser

Un nuevo procedimiento más sensible para la demostración de priones patológicos se basa en el barrido de dianas intensamente fluorescentes, o método SIFT. Se funda en el empleo de dos anticuerpos; uno lleva por “etiqueta” un colorante fluorescente verde y el otro, uno “rojo”. El marcado de los anticuerpos con colorantes fluorescentes verdes y rojos puede unirse específicamente en un punto de la molécula priónica. Si estos anticuerpos marcados con los colorantes fluorescentes se encuentran con una larga cadena de partículas PrP^{sc} se unen a ella por muchos puntos (*derecha*). Las partículas se detectan porque, al recibir la luz del correspondiente rayo láser, se iluminan intensamente según su color. Por el contrario, las moléculas PrP^c normales, que no forman cadenas, sólo emiten débiles destellos (*izquierda*).



4. PRINCIPIO del nuevo método de detección. Con el método SIFT se enfocan en un mismo punto de la muestra los rayos de un láser de argón y de otro de helio-neón. Siempre que una partícula situada en ese punto marcada con colorante fluorescente verde o rojo cae en el foco de los rayos láser emite una luz del correspondiente color. Las partículas se recogen y separan de acuerdo con el color emitido. La aparición simultánea de fluorescencia roja y verde revela la existencia de un prion.

un período comprendido entre cinco y veinte días. Para que pueda instaurarse un equilibrio transitorio, con una longitud de cadena estable, en este intervalo de tiempo ha de tener lugar por término medio una rotura de la cadena. El tiempo medio para que se presente una rotura en un determinado punto se cifra en torno a los treinta años. Puesto que cada cadena contiene por término medio unos mil posibles puntos de rotura, en el conjunto del agregado se registra una rotura de la cadena aproximadamente cada diez días. La construcción de la cadena y su rotura se encuentran, pues, en el fiel de la balanza. Pero el número de cadenas (y con ello el de sus extremos activos) crece de un modo exponencial.

Otra magnitud importante es la relación entre la velocidad de construcción y la velocidad de destrucción de las cadenas PrP^{sc}. Según mediciones realizadas en animales de laboratorio ambas velocidades serían de un orden semejante. Esto significa que el material infeccioso, para sobrevivir como tal, debe hallarse en continua replicación. No se conocen las causas de la destrucción; algo tendrán que ver las defensas inmunitarias, aunque pudieran haber otros procesos que desmontaran o inactivaran las cadenas PrP^{sc}. Por eso la velocidad de destrucción se expresa con un término negativo no específico, proporcional a la cantidad de material infeccioso presente. El peso que pueda tener esto para el cálculo de los tiempos de reacción es prácticamente despreciable.

Conviene traer a primer plano un punto más. El sustrato de la reacción, el PrP^{c} en transformación, se mueve libremente en la solución y puede así entrar en contacto con una cadena de PrP^{sc} de longitud creciente (lo cual justifica la imagen de reacciones rápidas de "difusión controlada"). Por el contrario, las cadenas PrP^{sc} acostumbran hallarse unidas a membranas. Esto explica por qué la "unidad infecciosa" comprende alrededor de 100.000 moléculas de priones a pesar de que las cadenas, por término medio, se rompen ya con una longitud de unas mil. Los fragmentos rotos permanecen vecinos y cooperan entre sí, como en un enjambre. Sólo cuando se desprenden de la membrana pueden dispersarse a distancia.

De los trabajos de Masel se infiere que el material requiere semanas para redoblarse. En amasar una concentración perceptible por los útiles analíticos se tarda casi un año.

Quedan muchas cuestiones abiertas. No podemos dar cuenta todavía de las fases inicial y final de la infección, las vías de contagio, el tiempo empleado en dañar el cerebro y la médula espinal o los trastornos operados en la fase final de la enfermedad. En todo caso la respuesta a estas preguntas corresponde a los especialistas en anatomía patológica del sistema nervioso.

Test para la detección precoz de la EEB

El conocimiento de los fundamentos cinéticos de la infección resulta decisivo para saber con cuánta precocidad puede diagnosticarse la enfermedad. A su vez un diagnóstico lo más temprano posible representa una importante premisa para una eficaz lucha contra la epidemia.

Ante la lentitud extrema de la multiplicación de los priones patógenos, una prueba de particular sensibilidad permitiría reconocer la enfermedad con meses, si no años, de anticipación. En 1994 pergeñé con mis colaboradores un método ideal, en teoría, para la identificación de cantidades mínimas de priones. Se basaba en una idea avanzada por Rudolf Rigler durante su estancia en el Instituto Max Planck de Química Biofísica de Göttingen entre 1968 y 1971 y que luego de-

sarrolló en el Instituto Karolinska de Estocolmo.

Se trata del método FCS (Espectroscopía de Fluorescencia de Correlación cruzada). Subvierte, podríamos decir, el principio clásico de la espectroscopía de fluorescencia, técnica en que las moléculas cuya presencia interesa hallar se marcan con un colorante que, al iluminarlo, emite luz fluorescente de una longitud de onda característica. Tras irradiar la muestra entera, se mide la intensidad de la luz de fluorescencia, parámetro que indica la concentración de moléculas fluorescentes buscadas. La cantidad de tales moléculas debe ser suficientemente grande para que la señal fluorescente medida supere con claridad la contaminación de fondo producida por los fotones dispersados y reflejados. Las concentraciones exigidas son de un orden superior a los nanomoles, es decir, deben estar por encima de las 10^{15} partículas por litro.

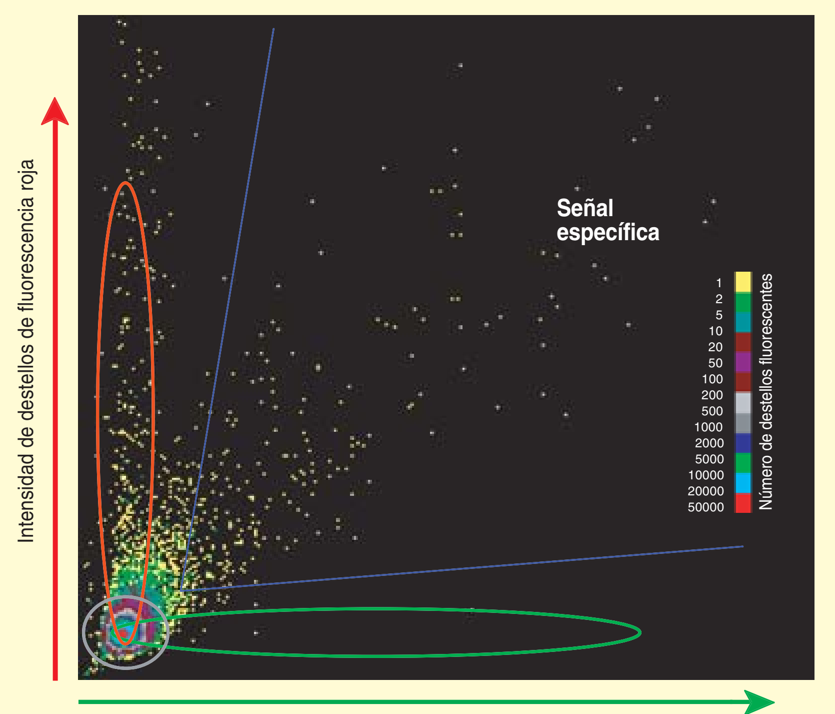
Con el nuevo método, empero, bastan concentraciones mucho menores. El secreto consiste en iluminar sólo parte de la muestra. Se enfoca un haz láser en un elemento espacial pequeño (el límite viene dado por la longitud de onda de la luz). En nuestro caso el volumen del láser no llega a un femtolitro (10^{-15} litros). El procedimiento ofrece la ventaja de que un elemento espacial tan pequeño irradia muy poca luz difusa y, por ende, la contaminación de fondo no crea perturbaciones enojosas. Podría objetarse que en tan mínimo volumen resultaría harto difícil hallar una sola molécula fluorescente.

Pero se trata de un inconveniente aparente, pues no registramos una señal estacionaria promedio, sino que esperamos que una molécula fluorescente entre en el foco del láser. Aunque sólo se detenga unos milisegundos, incluso menos, emite durante ese intervalo brevísimo una "salva" de miles de cuantos de luz fluorescente. Estos se nos revelan con el método de autocorrelación. Se trata lisa y llanamente de multiplicar las intensidades registradas en dos intervalos de tiempo consecutivos. El producto sólo resulta diferente de cero cuando ninguna de las dos intensidades es cero. Esto vale para una "salva de fotones", pero en general no sucede con el ruido de fondo formado por las señales espurias. De ese modo, en el registro, la suma de los productos de la intensidad se distingue del ruido de fondo durante el tiempo entero en que la molécula permanece en el foco del láser.

En esencia el aparato consiste en un microscopio de fluorescencia confocal de alta sensibilidad provisto de un procesador computarizado de las señales autocorrelacionadas (*véase la figura 4*). Este método permite, además de hacer visibles moléculas individuales, poner de manifiesto mínimas concentraciones del orden de mil millones de partículas por litro, e incluso concentraciones inferiores si aplicamos algunos dispositivos complementarios.

El método de la autocorrelación trabaja con un marcador fluores-

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CALIBRADO



Con objeto de comprobar la finura del método SIFT en el diagnóstico de priones patógenos en las personas, se toma líquido cefalorraquídeo de pacientes con trastornos neurológicos pero sin ninguna enfermedad provocada por priones y se mezcla con una solución que contenga determinada cantidad de agregados de priones infecciosos. La medición realizada con el método SIFT, al añadir anticuerpos marcados con un colorante fluorescente rojo o verde, ofrece los resultados aquí representados. Con una codificación de colores (*escala*) se ve el número de destellos luminosos registrados, a lo largo de la medición, en función de su intensidad. Lo más frecuente es que aparezcan señales débiles de anticuerpos fluorescentes, individuales o unidos a una molécula PrP^c, que caen exactamente en el foco del láser (*abajo, a la izquierda*). Por el contrario, cuando aparece en la muestra un aglomerado de partículas PrP^{sc} portadoras de muchos marcadores fluorescentes verdes y rojos, se presenta un intenso destello de luz formado por aproximadamente el mismo número de componentes rojos y verdes. Estos episodios se manifiestan como puntos amarillos situados en la zona superior derecha limitada por las dos líneas azules. Los puntos situados en el interior de las elipses roja o verde proceden de otros agregados proteicos que accidentalmente se han unido a un marcador fluorescente.

cente que se fija a una sustancia con gran afinidad por la molécula que se quiere revelar, dotándola de una suerte de etiqueta luminosa. El PrP^{sc} es un agregado proteico bastante grande, capaz de admitir varias etiquetas. Cumplen bien esa función los anticuerpos monoclonales, que se dirigen específicamente contra epitopos (puntos unión formados por pocos aminoácidos) de la molécula de PrP^{sc}.

Podemos entonces apelar a una nueva estratagema para aumentar todavía más la sensibilidad de la detección. En lugar de un único anticuerpo monoclonal se utilizan dos, dirigidos contra diferentes epitopos de la molécula de PrP marcados con dos colorantes de fluorescencia distintos, por ejemplo uno rojo y otro verde. Además, la autocorrelación se sustituye por una correlación cruzada. En cuanto el complejo de priones buscado cae en el foco del láser, emergen simultáneamente una potente señal roja y una intensa señal verde. Su coincidencia es señal inequívoca de la presencia del prion infeccioso. Cualquier otra molécula proteica tal vez pudiera casualmente unirse a uno de los dos anticuerpos, de manera que aparecería una señal roja o una verde, pero es sumamente improbable que aparezcan simultáneamente ambos marcadores sin la presencia del prion infeccioso. Por otra parte, una molécula PrP^{c} normal puede unirse a un marcador rojo y a uno verde, pero no forma agregados sustantivos y, en consecuencia, emite sólo una señal débil.

En su tesis doctoral Jan Biesschke, de mi equipo, en colaboración con Armin Giese, del grupo de Hans Kretzschmar en el hospital clínico de la Universidad de Göttingen, basándose en esta correlación cruzada, elaboró un método efectivo de diagnóstico molecular al que designamos SIFT (abreviaturas de la expresión inglesa para barrido de dianas intensamente fluorescentes). Con él se investigó el líquido cefalorraquídeo de pacientes que sufrían la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob.

La sensibilidad del procedimiento supera de diez a cien veces la de un método clásico de detección de la EEB, como es el de hibridación Western. Funciona incluso a una dilución en torno a 1/250.000, valor que equivale a una concentración de agregados del orden del pico- al femtomolar, es decir, entre un billón y mil millones de partículas por litro. Se realizaron con éxito mediciones de este tipo en pacientes con la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob y en otros con la de Alzheimer. Estos últimos sufren una grave forma de demencia senil que se caracteriza por la presencia de agregados proteicos en el cerebro, si bien en este caso no se trata de priones sino de depósitos de sustancia beta-amiloidea no infecciosos.

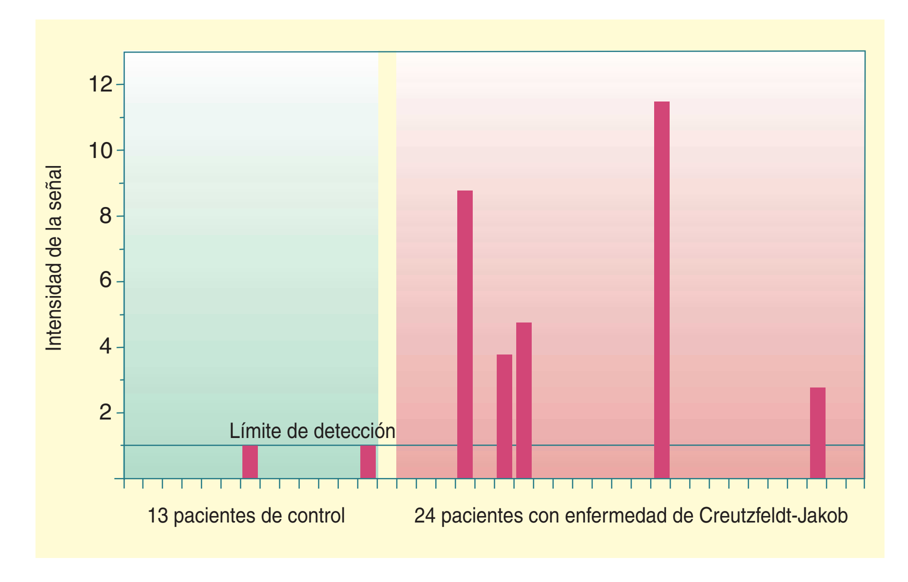
Además de su alta sensibilidad, el método SIFT permite acometer mediciones en fluidos corporales accesibles, como el líquido cefalorraquídeo. En teoría, pues, cabría practicar tests para la EEB en vacas vivas, aun cuando la extracción de líquido cefalorraquídeo resulte un tanto complicado que puede hacer obligada la anestesia.

5. COMPARACION DE SENSIBILIDADES. Serie de diluciones de material extraído del líquido cefalorraquídeo que contiene agregados de priones, analizada con el método antiguo y con el nuevo método SIFT. Como puede verse, con el método SIFT se demuestra la presencia de priones con diluciones mucho menores.

Buenas perspectivas de seguridad

Por lo que respecta a la identificación del agente causal de la EEB en la vaca el rigor debe ser extremo. No basta con demostrar que la concentración de priones patógenos es inferior al límite de sensibilidad de un procedimiento. Se exige que la carne esté exenta de material infeccioso. Los métodos de detección utiliza-

6. DEMOSTRACION de priones en el líquido cefalorraquídeo. Con el método SIFT se ha conseguido por primera vez poner de manifiesto la presencia de priones patógenos en el líquido cefalorraquídeo de pacientes con enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Aunque el test ha funcionado sólo en una cuarta parte de los casos, en los pacientes de control no se ha encontrado ningún falso positivo.



dos registran concentraciones de picomolares a nanomolares, cifras que, para un análisis químico, suponen una sensibilidad finísima. A tales valores corresponden, por kilo de carne, de 10^{12} a 10^{15} unidades moleculares, cantidades muy superiores a las 100.000 PrP^{sc} que contiene un núcleo germinal infeccioso. Ante este panorama, no sirve de consuelo que los nuevos procedimientos sean de uno a dos órdenes de magnitud más sensibles que los métodos en uso. Podemos, sí, "ver" moléculas individuales, pero lo que necesitamos es "encontrarlas" entre la inmensa cantidad de partículas del organismo.

La solución sería aumentar artificialmente los gérmenes existentes hasta que su concentración no supere el umbral de detección. En el caso de virus y bacterias cuya "potencia patógena" radica en los genes, es decir, en las moléculas de la herencia ARN (ácido ribonucleico) o ADN (ácido desoxirribonucleico), esto no supone hoy ningún problema. Con ayuda de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), cuyo descubridor Karry B. Mullis recibió por ello el premio Nobel en 1993, o procedimientos similares basados en la replicación del ARN o del ADN, las moléculas pueden multiplicarse en poco tiempo de forma exponencial hasta que su detección resulta asequible a los métodos analíticos corrientes.

Aquí entra en juego la cinética de la multiplicación. En el caso del ARN y del ADN bastan segundos o minutos para doblar el número de secuencias características. A partir de una muestra que contenga una secuencia de ADN, al cabo de media hora pueden obtenerse 2^{30} copias, es decir, cerca de mil millones. Mas, aun cuando dispusieran de un método similar los priones, tal multiplicación requeriría tiempos del orden de un año, a no ser que se descubriera un procedimiento para acelerar sustancialmente estas reacciones *in vitro*. Una vez conocido el mecanismo de la reacción, un tal hallazgo entra dentro de lo posible. Habría que sacarle partido a la naturaleza hidrofóbica de los agregados, que tienden, en consecuencia, a adherirse a las membranas.

Y ahora vuelvo a una afirmación hecha al principio del artículo: la solución al problema de la EEB —caso de que exista— pasa por la aplicación racional de nuestros conocimientos del mecanismo y de la cinética de la multiplicación de los priones. Hemos de concentrar los esfuerzos en domeñar la cinética de suerte tal, que el más mínimo rastro del agente causal pueda multiplicarse en el tubo de ensayo hasta alcanzar una cantidad detectable. Unicamente así descubriremos la infección en un estadio inicial.

Llegados aquí, la pregunta sobre qué sea un prion adquiere una nueva perspectiva. El agente infeccioso no es ni una molécula proteica aislada, ni un polímero definido de unidades proteicas. Se trata más bien de una dispersión de agregados proteicos, en general unidimensionales, compuestos de moléculas PrP^{sc} y caracterizados por una determinada longitud media. Pero la agresividad de la unidad infecciosa no depende sólo de la longitud media de la cadena. Los agregados están presumiblemente unidos a las membranas y aparecen en asociaciones que son la fuente elemental de infección.

Los únicos elementos contagiosos son los extremos de las cadenas. En consecuencia, la capacidad de contagio de una cadena con una longitud de cien mil unidades PrP^{sc} es mil veces inferior que la misma cantidad de unidades PrP^{sc} distribuidas en mil piezas catenarias con una longitud media. El número de elementos infecciosos, los eslabones terminales de las cadenas, es el que se corresponde con un crecimiento exponencial sostenido.

Bibliografía complementaria

PRIONICS. Manfred Eigen, en *Biophysical Chemistry*, vol. 63, pág. A1; 1996.

QUANTIFYING THE KINETIC PARAMETERS OF PRION REPLICATION. J. Masel, V.A.A. Jansen y M. A. Nowak, en *Biophysical Chemistry*, vol. 77, pág. 139; 1999.

MOLEKULARE DIAGNOSTIK. Manfred Eigen, en *Das Gen und der Mensch*, dirigido por G. Gottschalk. Wallstein Verlag, 2000.

ULTRA-SENSITIVE DETECTION OF PATHOLOGICAL PRION PROTEIN AGGREGATES BY DUAL-COLOR SCANNING FOR INTENSELY FLUORESCENT TARGETS (SIFT). J. Bieschke et al., en *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, vol. 97, pág. 5468; 2000.

Roland Lehoucq y Jean-Michel Courty

Un vacío más o menos... vacío

Una presión débil, ¿basta para definir el vacío? No para un físico, para quien el vacío se mide en términos de colisiones moleculares. Para crear el vacío, hay que bombear el gas contenido en el recinto a vaciar a fin de que disminuya el número de moléculas que encierra. Pero en virtud de mecanismos físicos que se desencadenan cuando los choques físicos son poco numerosos, el bombeo se hace más difícil conforme disminuye el número de moléculas presentes en el recinto. Entonces, la presión deja de ser un parámetro pertinente y hay que reemplazarla por el "recorrido libre medio", es decir, por la distancia recorrida por una molécula entre dos choques. Tratemos de entender cómo se produce ese vuelco entre la noción de presión débil y la de recorrido libre medio en un gas rarificado, examinando de cerca cómo se hace el vacío.

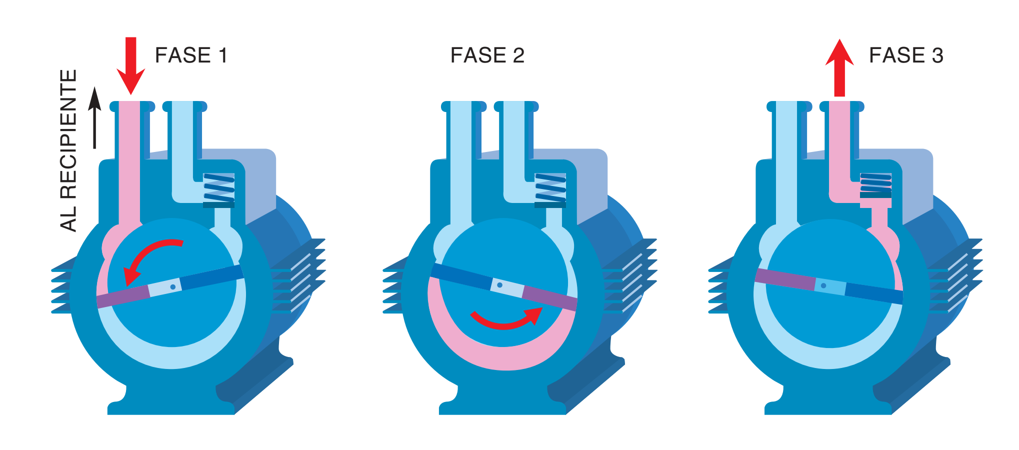


Para un físico o para un ingeniero, esa expresión significa ante todo extraer los gases del recinto. En un líquido, y aún más en un sólido, las fuerzas de atracción son lo bastante intensas para mantener a átomos y moléculas a distancias del mismo orden que el tamaño de las moléculas o de los propios átomos. No ocurre lo mismo con los gases, pues la agitación térmica puede más que la atracción: en un gas, las moléculas están separadas unas distancias muy superiores a su tamaño y esencialmente interactúan sólo durante unas breves colisiones. Dado que sus moléculas pueden desplazarse con libertad, un gas tiende a ocupar espontáneamente todo el volumen disponible.

La bomba de paletas

Los sistemas se basan en esta propiedad, en particular las bombas de paletas, uno de los dispositivos más empleados para crear vacíos industriales. Primero, la rotación de unas paletas solidarias de un tambor permite que el gas del recinto a vaciar ocupe un volumen mayor que el propio recinto. Ese gas (*en rosa en la figura 1*) es arrastrado por el movimiento de las paletas (fase 1), luego aislado del recinto y del exterior (fase 2), y por fin expulsado al exterior (fase 3). Al proseguir la rotación, el recinto vuelve a quedar aislado mientras es evacuado el volumen aspirado. Con las bombas de paletas, se alcanzan presiones inferiores a un pascal, o sea, una cienmilésima de la presión atmosférica. Para ir más allá, hay que disponer de otros dispositivos de bombeo que releven a la bomba de paletas cuando ésta ya no sea eficaz.

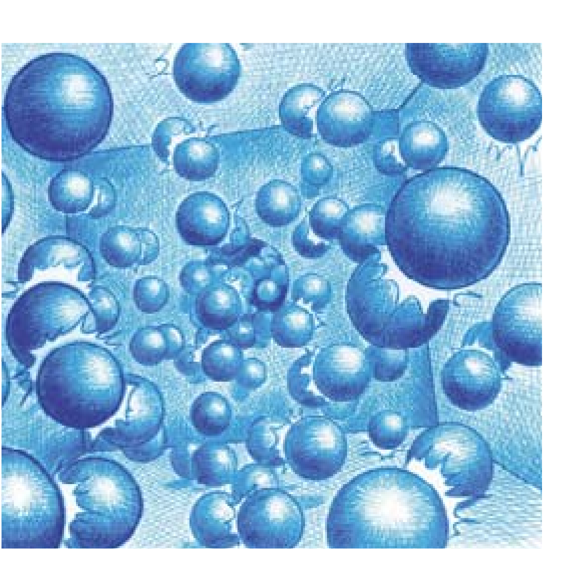
Veamos por qué, en la mayoría de los casos, la presión caracteriza la calidad del vacío. Esa magnitud macroscópica mide la fuerza ejercida por el gas sobre las paredes del recinto. Es el resultado de los incesantes choques de las moléculas con las paredes. Por tanto, la presión de un gas es tanto mas alta cuanto más numerosos son los choques (la densidad de moléculas en el gas es alta), o cuanto más violentos son los choques (la agitación térmica es intensa). La presión es proporcional al producto de la densidad del gas por su temperatura. Y sólo puede ser débil en dos situaciones: cuando el gas está muy frío o cuando el recinto



1. Una bomba de paletas está conectada al recipiente a vaciar. Las paletas, solidarias de un tambor giratorio, arrastran el aire (en rosa) *contenido en el recinto* (fase 1)*; aíslan ese aire robado al recinto* (fase 2)*, y luego lo ponen en comunicación con el medio exterior* (fase 3)*, al que se escapa. Al hilo de los ciclos, el aire es aspirado del recinto donde se hace el vacío*

contiene pocas moléculas. El vacío suele crearse a temperatura constante (la del recipiente), de modo que la presión mide directamente el número de moléculas por unidad de volumen.

Hay, no obstante, situaciones en que la presión deja de ser un parámetro adecuado para caracterizar al vacío. Prefieren entonces los físicos centrarse en el "recorrido libre medio", definido antes. Contrariamente a la presión, el recorrido libre medio es una magnitud microscópica, aplicable en todas las situaciones. Un razonamiento sencillo basta para determinar su valor en buena aproximación. Al desplazarse, una molécula barre en el curso de su movimiento un cilindro cuya sección es igual a la sección de la molécula y cuya longitud es la distancia recorrida, y sufre tantos choques cuantas moléculas haya en ese volumen. La longitud correspondiente a un solo choque, es decir, al recorrido libre medio, es tanto mayor cuanto menor es el número de moléculas que encuentre y cuanto más pequeña es la molécula. Así el recorrido libre medio es inversamente proporcional al producto del número de moléculas por unidad de volumen por la sección geométrica de una molécula. Esta, en general, es del orden de 0,5 nanómetros cuadrados. A temperatura ambiente (25 ºC) y a una presión igual a la presión atmosférica normal, la densidad cúbica de moléculas se cifra en $2,4 \times 10^{25}$ por metro cúbico. Una molécula recorre entonces una media de 0,8 micras entre dos choques, o sea, 200 veces su diámetro. Al ser su velocidad media de alrededor de 300 metros por segundo, resulta que las moléculas del gas sufren unos 4000 millones de choques por segundo.

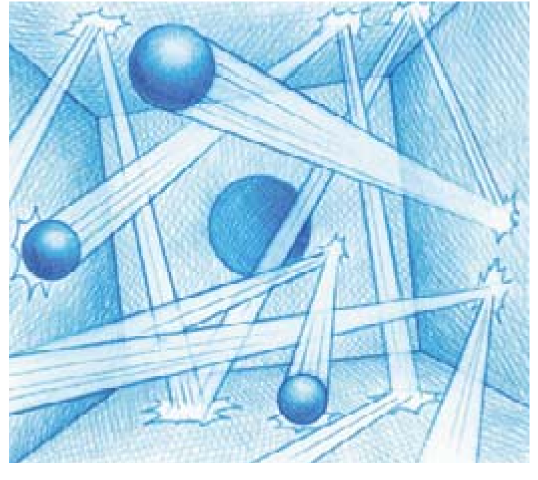


2. En régimen hidrodinámico, el recorrido libre medio, es decir, la distancia recorrida por una molécula entre dos choques con sus semejantes, es inferior al tamaño del recinto. En este régimen, el gas se comporta como un fluido que corre sin interaccionar con las paredes

Régimen hidrodinámico y régimen molecular

Así, el comportamiento de un gas rarificado depende del "sitio" del que disponen sus moléculas, de su recorrido libre medio. Si éste es muy pequeño respecto al tamaño del recinto, una molécula interactuará a menudo con sus congéneres. En ese caso, las colisiones uniformizan las propiedades del gas. Se dice entonces que el gas está en régimen "hidrodinámico", pues se comporta como un fluido homogéneo. Las colisiones entre moléculas (resultado de la agitación térmica) predominan sobre los demás fenómenos y confieren al gas una velocidad media igual a la velocidad media de las moléculas, como en un fluido. Las colisiones intermoleculares microscópicas generan la viscosidad macroscópica del gas, es decir, su resistencia a fluir por los orificios y a disipar energía. Las interacciones con las paredes, cuyo papel se limita a confinar las moléculas, son poco numerosas.

En cambio, cuando el recorrido libre medio es mayor que el tamaño del recinto, una molécula se topa con pocas de sus semejantes. Las moléculas se desplazan entonces de pared a pared sin interaccionar entre ellas y el gas adopta un nuevo comportamiento: está en "régimen molecular". La presión a la que aparece ese régimen depende del tamaño del recipiente considerado. Así, a temperatura ambiente, en un tubo capilar de 10 micras de diámetro interior el régimen molecular sobreviene para una presión de 100 pascal. Esta presión, 1000 veces inferior a la presión atmosférica normal, se consigue fácilmente con una bomba de paletas. En cambio, en un recipiente de 10 centímetros de longitud, al régimen molecular se llega con una presión de 0,08 pascal, inalcanzable para una bomba de paletas. La densidad es entonces de unas 2×10^{19} moléculas por metro cúbico.



3. En régimen molecular, el recorrido libre medio de las moléculas es mayor que el tamaño del recipiente. En este régimen, las únicas interacciones tienen lugar con las paredes

Este valor, así como los de la densidad molecular en el mejor de los vacíos obtenibles en el laboratorio, son aún enormes respecto a los que reinan en los espacios interestelares. Estos son unos vacíos más vacíos que el mejor de los que soñáramos conseguir. En una nube interestelar, el recorrido libre medio de una molécula es inversamente proporcional a la densidad. Esta varía mucho en función de la temperatura de la nube. En las nubes interestelares frías (100 kelvin) en cuyo seno se forman las estrellas, la densidad es por ejemplo de 40 moléculas por centímetro cúbico. Paradoja aparente es que los astrofísicos consideren que una tal estrella esté en régimen hidrodinámico. Pero así es. Pese a que los recorridos libres medios sean gigantescos (algunos centenares de millones de kilómetros), son aún muy inferiores a los tamaños de las nubes interestelares, que se miden en billones de kilómetros.

Los límites del vacío

¿Por qué son limitados los vacíos obtenibles en la Tierra? Funda-

mentalmente, a causa de diversos defectos mecánicos, entre otros las fugas en las juntas (el aire penetra en el recinto de la bomba, donde la presión es menor que la atmosférica), o incluso una estanqueidad deficiente de las juntas “desgastables”. En régimen hidrodinámico las moléculas fluyen por el tubo. Por contra, cuando las moléculas se reflejan en las paredes, la situación cambia: en vez de rebotar como una bala en un muro, una molécula que topa con una pared se adhiere a ella un instante y luego sale en una dirección cualquiera. Debido a las fuerzas atractivas de Van der Waals, ese fenómeno tiene unas consecuencias asombrosas. Una molécula que llegue a una pared con una incidencia de 30 grados puede luego salir hacia adelante rasando la pared, perpendicularmente a ésta, e incluso hacia atrás. Para salir del recinto, una molécula debe tener una velocidad paralela al eje del tubo. No obstante, incluso cuando haya alcanzado el tubo, puede estancarse en él, puesto que cambia de dirección tras cada choque con la pared. Hasta puede que regrese al recinto a vaciar. Esta es la razón por la que es imperativo emplear tubos cortos y de gran diámetro para conseguir vacíos moleculares. Así se reducen al máximo los efectos perjudiciales de los rebotes en las paredes del tubo.

Ahora bien, esos efectos de pared no son desalentadores, pues sabiendo aprovecharlos pueden favorecer la obtención del vacío. Cuanto más baja es la temperatura de la pared, tanto más tiempo permanecen adheridas a ella las moléculas. Hasta puede que se queden casi indefinidamente cuando esa temperatura es inferior a la de licuefacción del gas, incluso a la de solidificación. En este caso, la misma pared hace de bomba (de trampa) para mejorar el vacío una vez extraído el grueso de las moléculas, ya que ninguna de las partículas que incidan en ellas regresará al recinto. Una pantalla enfriada a la temperatura del helio líquido (4 kelvin) capta así a todas las moléculas contenidas en un recinto. Una manera hábil de sacar partido de un inconveniente.

Aventuras problemáticas

Dennis E. Shasha

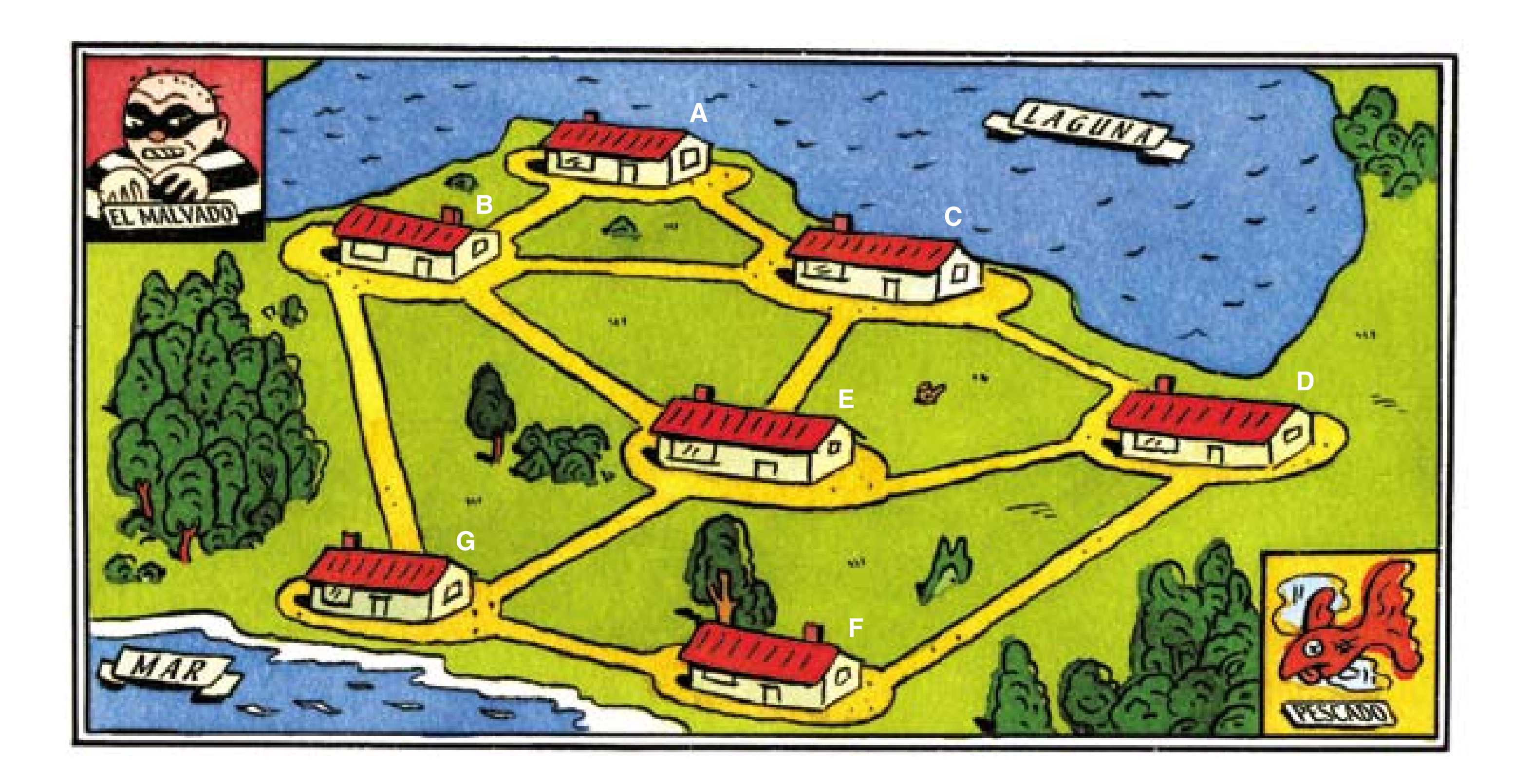
Algo escamante

Parecía mentira que en un paraje tan encantador pudiera ocurrir un delito tan absurdo y repulsivo. Siete casitas rústicas, cuatro de ellas al borde de una laguna (de A a D), dos frente al mar (F y G) y una en medio de las demás (E), estaban conectadas por senderos, como se indica en el mapa. Un pescador vio a un individuo de mala catadura, portador de un gran cesto, acercarse a la urbanización desde la laguna y deslizarse en el interior de una de las casitas situadas al borde de esa masa de agua. El hombre fue después recorriendo los senderos que iban de una casita a otra, dejando por el camino pescado podrido.

Al examinar una serie de pisadas en el barro, la policía pudo establecer que el gamberro había recorrido cada senda exactamente una vez. Los detectives no encontraron huellas que se alejasen de la urbanización, y concluyeron que el escamante personaje seguía todavía oculto en una de las casitas. Desafortunadamente, las huellas de los senderos estaban tan borrosas, que los policías no estaban seguros de la dirección en que apuntaban. Y lo que es peor, el pescador no conseguía recordar en cuál de las cuatro casitas que orillaban la laguna había entrado el sujeto en primer lugar. Por todo ello, la policía no era capaz de reconstruir la ruta del malvado: todo cuanto sabían era que en ningún caso había pasado dos veces por el mismo lugar.

La tarea que les propongo es averiguar en qué casita se encuentra escondido el delincuente. Una rama de las matemáticas, llamada teoría de grafos, puede ayudarless a deducir la solución, pues el mapa puede ser considerado como un grafo, que es una colección de nodos (*aquí representados por las casitas*) conectados por lados (los senderos). La solución, el mes que viene.

Solución del problema del mes pasado: Una forma de evitar que el tablero se descompense consiste en ir retirando los paquetes de sus posiciones en este orden: posición 1 (10 kg), 8 (5 kg), –6 (8 kg), 5 (9 kg), –8 (4 kg), 8 (10 kg), –3 (10 kg), –4 (5 kg), 2 (9 kg), –2 (2 kg), 3 (3 kg), –3 (2 kg), 5 (1 kg), –6 (1 kg) y 2 (5 kg)



Perder + perder = ganar. Juegos de azar paradójicos

El estudio de ciertas propiedades del movimiento browniano —el movimiento azaroso que experimentan pequeñas partículas debido a las colisiones con las moléculas del fluido en que están inmersas y cuya teoría fue establecida por Einstein en 1905— ha inspirado recientemente una curiosa paradoja. Se trata de dos juegos de azar muy simples diseñados de modo tal que el jugador, en promedio, pierde en ambos. La paradoja consiste en que esta tendencia se invierte cuando los juegos se alternan, en cuyo caso el jugador tiene una tendencia ganadora constante. Veamos en detalle las reglas de estos dos juegos.

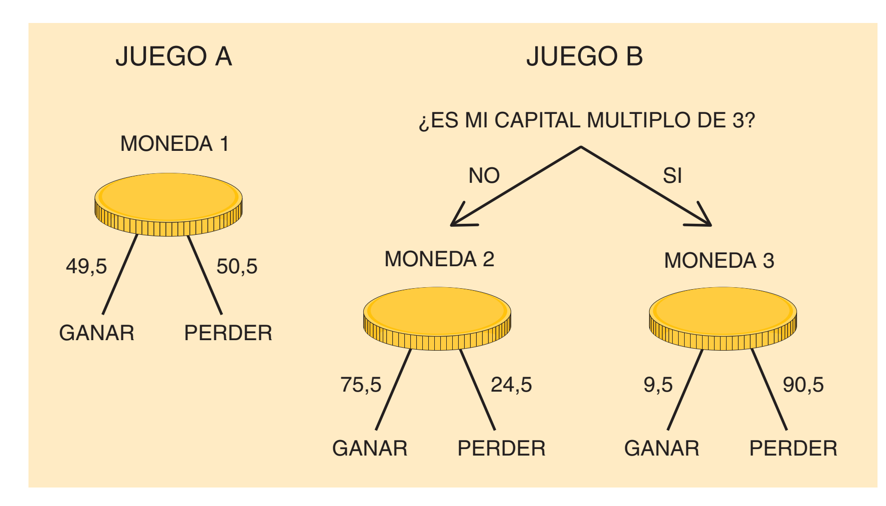
El primero de ellos —lo llamaremos *juego A*— es similar a apostar una cierta cantidad, digamos 1 euro, a rojo o negro en la ruleta de un casino: ganamos 1 € con una probabilidad ligeramente inferior al 50 % y perdemos 1 € con una probabilidad ligeramente superior al 50 %, ya que con el cero gana siempre la banca. Supongamos que se gana con una probabilidad del 49,5 % y se pierde con una probabilidad del 55,5 % (estas probabilidades no coinciden exactamente con las de la ruleta, pero nos permitirán describir de modo sencillo la paradoja).

En el segundo juego —lo llamaremos *juego B*—, en cada turno también ganamos o perdemos 1 €, pero ahora las probabilidades dependen de lo que llevamos ganado hasta el momento (que puede ser una cantidad negativa): si lo que llevamos ganado —lo llamaremos *el capital*— es múltiplo de 3, entonces ganamos 1 € con probabilidad 9,5 %; si el capital no es múltiplo de 3, la probabilidad de ganar es del 74,5 %. Las reglas de los dos juegos se muestran en la figura 1.

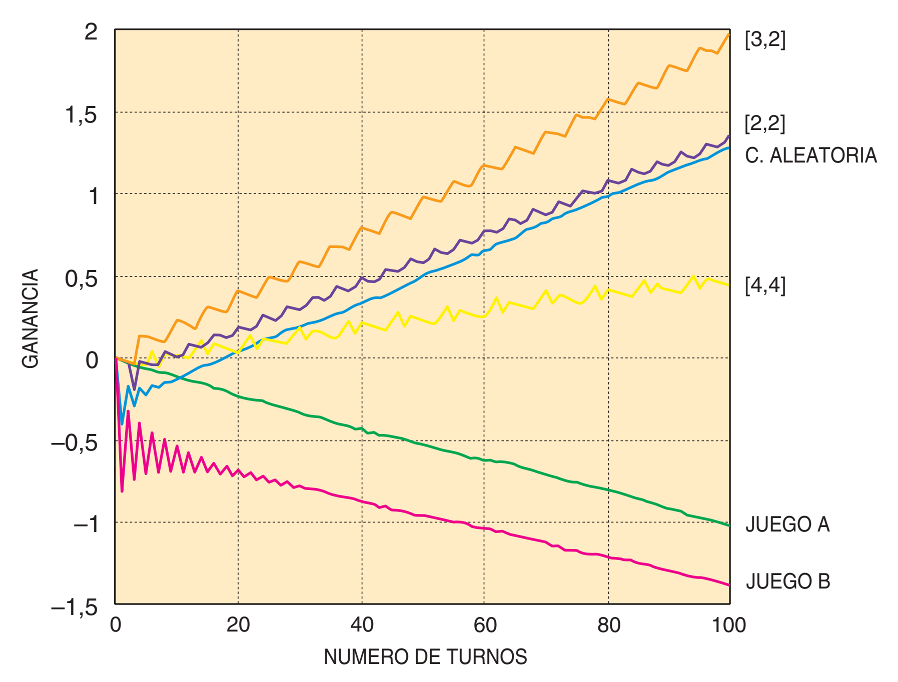
Ambos juegos son desfavorables, es decir, la tendencia promedio es perdedora (esto es evidente en el caso del juego *A*; el juego *B* requiere un análisis más detallado, pero puede también demostrarse que es desfavorable en promedio). Sin embargo, ciertas combinaciones de los dos juegos tienen una tendencia media ganadora. Este comportamiento inesperado, que se conoce como *Paradoja de Parrondo*, se observa en la figura 2, en la que se muestra el capital promedio de 5000 jugadores independientes en función del número de turnos jugados. Las curvas descendentes indican los casos en que se juega a *A* o *B* separadamente. Las curvas ascendentes corresponden a distintas combinaciones: [2,2] significa que jugamos la sucesión *AABBAABB*..., [3,2] la sucesión *AAABBAAABB*..., etc. Finalmente, la "combinación aleatoria" consiste en que, en cada turno, elegimos completamente al azar a cuál de los dos juegos jugamos.

No es difícil entender por qué ocurre este comportamiento paradójico. Obsérvese que, en el juego *B*, la probabilidad de ganar es muy baja cuando el capital es múltiplo de 3 y bastante alta cuando no lo es. Podríamos decir que el juego *B* contiene dos tendencias, una favorable y otra desfavorable. Las probabilidades están elegidas de modo tal, que el juego es ligeramente perdedor, es decir, la tendencia desfavorable domina sobre la favorable. Lo que ocurre cuando combinamos ambos juegos es que el *A* invierte este dominio. A pesar de que el juego *A* es en sí ligeramente desfavorable, hace que el capital sea menos veces múltiplo de 3 y que, por tanto, juguemos más veces con la probabilidad alta de ganar, la del 74,5 %. El juego *A*, en la alternancia, cumple un doble papel: añade por un lado su propia tendencia desfavorable, pero, por otro lado, refuerza la tendencia favorable del juego *B*. El resultado global de este doble papel es, en casos como los de la figura, invertir la tendencia y dar lugar al comportamiento paradójico.

Existe otro mecanismo interesante tras la paradoja. Lo podemos ilustrar con el siguiente ejemplo en la



1. Reglas de los juegos paradójicos



2. Ganancia media en cada uno de los juegos y en sus combinaciones

secuencia *AABBAABB*... Supongamos que jugamos *A* con capital múltiplo de tres, 15 € por ejemplo, y que perdemos los dos turnos de *A*. En tal caso, retomamos el juego *B* con un capital igual a 13 €, para el que la probabilidad de ganar es alta. Por lo tanto, lo más probable es que el capital vuelva hacia 15 € en los dos turnos de *B*. Podemos decir que el juego *B* no permite que las pérdidas de *A* se "consoliden", pero sí permite que lo hagan las ganancias. De modo que, aunque *A* sea desfavorable, y sea mayor la frecuencia de turnos perdidos que la de turnos ganados, el juego *B* se encarga de "destruir" las fluctuaciones negativas y de "consolidar" las fluctuaciones positivas. Decimos entonces que el juego *B* actúa como un *rectificador* o una *ratchet*, término inglés que denota una rueda de dientes asimétricos que sólo puede girar en un sentido y que se utiliza, entre otras muchas cosas, para *rectificar* el movimiento fluctuante de la muñeca y dar cuerda a un reloj de pulsera. Este efecto rectificador de fluctuaciones genera un movimiento sistemático en una dirección sin necesidad de ninguna fuerza, simplemente "esperando" a que ocurran las fluctuaciones adecuadas.

Los dos mecanismos que hemos descrito: la reorganización de tendencias y la rectificación de fluctuaciones, son bastante simples y básicos, de modo que pueden estar presentes en muchas situaciones. La paradoja nos muestra que alternar dinámicas aleatorias puede dar lugar a efectos inesperados, contrarios a los de cada dinámica por separado, y esta afirmación general sugiere nuevas líneas de investigación en física, química, biología o economía, en las que se estudie el comportamiento de sistemas diversos sometidos a una alternancia de temperaturas, campos eléctricos u otras condiciones externas.

Desde la publicación de la paradoja se han descrito algunas modificaciones, como juegos en donde las reglas no dependen del capital y juegos colectivos. Todas estas investigaciones indican que la paradoja no se limita a situaciones particulares. Recientemente, Paul Davies ha apuntado que podría tener alguna relevancia en la explicación del origen de la vida, ya que ésta requiere una sutil combinación de azar y necesidad y los juegos nos muestran mecanismos sencillos en donde el azar es transformado en un movimiento o tendencia sistemática, es decir, en un cierto orden.

Juan MR Parrondo
Facultad de Físicas, Universidad Complutense, Madrid

NEXOS

James Burke

La ruta de la seda

A mediados del siglo XVII, en el barrio londinense de Spitalfields se encontraba uno de los pocos talleres en el norte de Europa fabricantes de seda combinada, un tejido delicado, iridiscente y caro. En 1668 se acercó por allí cierto comerciante de telas holandés. Se llamaba Antonie Thonisoon y andaba tras lo último en diseño inglés. Quedó asombrado cuando observó los dibujos que formaban las fibras de la seda, ampliadas a un tamaño mucho mayor que el que era posible ver con la lupa que utilizaba para examinar los tejidos.

Alentado por este fantástico descubrimiento, regresó a su ciudad, Delft, cambió su apellido por el más aristocrático de van Leeuwenhoeck, se interesó por el pulimento de las lentes (en el siglo XVII, el equivalente al diseño de los microprocesadores de los ordenadores) y empezó a codearse con la elite científica local. El día de Navidad de 1676 el resultado de sus nuevos intereses prorrumpió sobre una atónita Real Sociedad londinense en forma de una larga carta que incluía ilustraciones de lo que Leeuwenhoeck había contemplado a través de una de sus lentes de 500 aumentos.

Lo que perturbó a todo el mundo fue su afirmación de que esos objetos diminutos estaban vivos. El los había visto moverse. Todo un mundo nuevo se abría a la ciencia: rotíferos y sus cilios ondulantes, protozoos que se dividían, pelos emergiendo de su raíz, espermatozoides y demás organismos; calculaba Leeuwenhoeck que cabían treinta millones de esas criaturas en un grano de arena.

Para un alemán de paso por Holanda, los organismos microscópicos también valían para demostrar la teoría de la "gran cadena de los seres". Según esta teoría todas las formas de vida, desde el hongo más humilde hasta la especie humana, habían sido diseñadas por Dios en series sucesivas de creciente, aunque infinitésima, complejidad. El teutón de marras era Gottfried W. Leibniz. Tenía un justificado interés por las cosas microscópicas. Había desarrollado hacía poco el cálculo infinitesimal para determinar el ritmo de aceleración de los planetas. En 1678, durante una visita a Delft, Leibnitz observó los organismos de Leeuwenhoeck. Tras ello aseguró que los organismos demostraban que las diferencias entre las especies eran tan diminutas, "que es imposible para los sentidos y para la imaginación fijar el punto exacto en que una empieza o acaba otra".

La filosofía de Leibniz, basada en la existencia de elementos fundamentales infinitésimamente pequeños, o mónadas, acabó por convertirse en el substrato universal que anhelaba encontrar el siglo XVIII. La apelación de Jean-Jacques Rousseau a la vida del buen salvaje y la desilusión general por los efectos sociales de la revolución industrial animaron la búsqueda de una fórmula que permitiera aunar hombre y naturaleza. En Jena, cuna de la nueva visión romántica de la vida, la obra de Friedrich Schelling, *Naturphilosophie*, fundió los recientes descubrimientos científicos (polos magnéticos opuestos, cargas eléctricas positiva y negativa, ácidos y bases químicas) en una teoría unificada sobre la naturaleza como producto de la resolución dinámica de fuerzas en conflicto mutuo.

Fue en 1820 cuando el danés Hans Christian Ørsted, mientras intentaba aplicar esta visión "conflictiva" a la electricidad y al magnetismo, hizo pasar más electricidad por un cable de la que pensaba podía admitir. El cable se volvió incandescente; convencido así de la vinculación de la electricidad con la luz, extendió su campo de investigación y descubrió que la electricidad ejercía un efecto a distancia sobre la aguja imantada.

Veintiún años más tarde este principio electromagnético llevó a Samuel F. B. Morse a desarrollar el telégrafo. En 1842 Morse ayudó a Sam Colt, inventor del revólver y vecino de Morse en el Washington Square de la ciudad de Nueva York, al suministrarle elementos electromagnéticos para detonar una de sus nuevas minas subacuáticas. Quiso éste demostrar su potencia al presidente John Tyler volando un barco en el río Potomac. También aspiraba Colt impresionar a los rusos, interesados por su invento. Pero no se avino a desvelar el mecanismo de detonación. Los rusos acabaron cerrando el trato con Alfred B. Nobel, cuyas minas no necesitaban señales eléctricas para su detonación. Cuando el casco de un buque chocaba con la mina de Nobel, forzaba su cápsula principal y rompía un tubo de vidrio del interior, que liberaba su contenido de ácido sulfúrico sobre una mezcla de potasio y azúcar provocando una llama que encendía la pólvora.

En tiempos de la guerra de Crimea los rusos sembraron el puerto de Sebastopol de minas de Nobel. La flota aliada de aprovisionamiento se vio obligada a fondear fuera de la rada. Los barcos quedaron a merced del violentísimo huracán desencadenado el 14 de noviembre de 1854, que destruyó la flota y las provisiones del ejército. Durante ese invierno se sufrieron terribles privaciones, hasta el punto de que las investigaciones subsiguientes de Florence Nightingale forzaron un cambio en el gobierno británico e inspiraron a Jean-Henri

Dunant la fundación de la Cruz Roja.

Pero fue la pérdida del buque de guerra *Henri IV*, orgullo de la marina francesa, lo que tuvo mayor resonancia. Francia entera se conmocionó con el hundimiento. Al día siguiente el emperador Napoleón III hizo un llamamiento para que se estableciera en todo el país un servicio de predicción meteorológica. Hacia 1860 se publicaban diariamente partes meteorológicos telegráficos en Europa. Sobresalió en la nueva ciencia un joven oficial de la marina estadounidense, Matthew Maury, quien durante nueve años coleccionó partes meteorológicos, reuniendo el equivalente a un millón de días de observación. Le sirvieron para asegurar que las tormentas se dividían en circulares y oblongas.

En 1930, el Instituto Americano de Meteorología llevaba más de sesenta años de funcionamiento y nadie se había esforzado todavía en analizar los datos recogidos por la propia entidad. Hasta que John W. Mauchly, joven profesor de física, asumió el reto. El problema radicaba en el tiempo que se requeriría para el análisis de semejante volumen de datos mediante los métodos al uso.

Pero Mauchly descubrió que los investigadores que estudiaban los rayos cósmicos contaban las partículas sirviéndose de una válvula de vacío. Los impactos producidos por las partículas la activaban y desactivaban hasta 100.000 veces por segundo. Mauchly se percató de que las válvulas de vacío permitirían automatizar el trabajo de cálculo al actuar como dispositivo de almacenamiento de datos.

Antes de que pudiera desarrollar su idea estalló la Segunda Guerra Mundial. Llamado a filas, no tardó en encontrar otro problema matemático, cuya resolución también conllevaba demasiado tiempo. Se trataba de calcular las tablas de artillería usadas para instruir a los soldados sobre cómo apuntar y disparar bajo cualquier tipo de condiciones. Al principio de la guerra, trabajaban decenas de mujeres matemáticas en los laboratorios de investigación balística del ejército en Aberdeen. Necesitaban, cada una, treinta días para completar una tabla de artillería destinada a un solo cañón. Una sola trayectoria del proyectil que considerara todas las variables que pudieran condicionar su vuelo requería 750 multiplicaciones; una tabla para un cañón implicaba del orden de tres mil trayectorias. En 1942 se solicitaron del laboratorio de cálculo nuevas tablas a un ritmo de seis por semana, poniendo al centro al borde del colapso.

Mauchly llevó adelante su idea calculadora de la válvula de vacío. El ejército la aceptó. El proceso consistía básicamente en el encendido o apagado de una serie de tubos de vacío, distribuidos en grupos de diez, de forma que se pudiera utilizar como un número el total de los que se hallaban en un determinado estado. La máquina de Mauchly resultó operativa hacia 1946, demasiado tarde para el éxito bélico, pero a tiempo de calcular cómo provocar una explosión atómica. Hablo del ENIAC (Integrador y Computador Numérico Electrónico), la primera computadora electrónica del mundo.

Para suministrar datos al ENIAC se utilizaban tarjetas perforadas, como las ideadas por Herman Hollerith para el censo estadounidense de 1890. Le proporcionó la idea su cuñado, que trabajaba en la industria textil y conocía un sistema de tejido automático basado en ganchos que presionaban una cartulina agujereada. Allí donde había un agujero, el gancho lo atravesaba y engarzaba el hilo. Hollerith reemplazó los ganchos por un cable conductor; cada filamento representaba una parte de los datos censales. Cuando el filamento pasaba por un agujero, establecía contacto y hacía avanzar el contador al número siguiente. El sistema aceleró notablemente el recuento, registrando a 62.947.714 americanos en la vigésima parte del tiempo requerido en el censo anterior y para una población mucho mayor.

La técnica del tejido modificada por Hollerith se utilizaba para automatizar la producción de ropa confeccionada con un material que era demasiado caro como para permitirse errores: la seda.

LIBROS

Biodiversidad

Y sus fuentes

UTOPIA'S GARDEN. FRENCH NATURAL HISTORY FROM OLD REGIME TO REVOLUTION, por E. C. Spary. The University of Chicago Press; Chicago, 2000. **NATURE'S GOVERNMENT. SCIENCE, IMPERIAL BRITAIN, AND THE "IMPROVEMENT" OF THE WORLD,** por Richard Drayton. Yale University Press; New Haven, 2000. **THE EMPEROR OF NATURE. CHARLES-LUCIEN BONAPARTE AND HIS WORLD,** por Patricia Tyson Stroud. University of Pennsylvania Press; Philadelphia, 2000.

STABILITY AND COMPLEXITY IN MODEL ECOSYSTEMS, por Robert M. May. Princeton University Press; Princeton, 2001. **BIODIVERSITY DYNAMICS. TURNOVER OF POPULATIONS, TAXA, AND COMMUNITIES.** Dirigido por Michael L. McKinney y James A. Drake. Columbia University Press; Nueva York, 1998. **THE UNIFIED NEUTRAL THEORY OF BIODIVERSITY AND BIOGEOGRAPHY,** por Stephen P. Hubbell. Princeton University Press; Princeton, 2001.

REEF EVOLUTION, por Rachel Wood. Oxford University Press; Oxford, 1999. **RÉFLEXIONS SUR L'ÉVOLUTION DE LA FLORE ET DE LA VÉGÉTATION AU MAGHREB MÉDITERRANÉEN,** por Pierre Quézel. Ibis Press; París, 2000.

Palabra comodín en ocasiones, conjuro en cuyo nombre ideas de estricta referencia política adquieren veste de rigor científico, la biodiversidad es, pese a tal prostitución, un concepto de profundo alcance biológico e histórico. Por ella hemos de entender no sólo la riqueza de especies, sino también la variabilidad biológica en todos sus niveles, del génico al ecológico. Desde los primeros esbozos teóricos de los biogeógrafos hasta la articulación matemática iniciada hace casi cuarenta años se buscan las razones últimas del sorprendente número, reparto y asociación de especies.

Dos instituciones prepararon el terreno, el Real Jardín de París y el de Kew. De ambos arrancan las líneas paralelas en que se moverá el concepto de biodiversidad, a saber, la que depura la teoría ecológica subyacente y la del aprovechamiento de tamaña riqueza para beneficio del hombre: *Utopia's Garden. French Natural History from Old Regime to Revolution* y *Nature's Government. Science, Imperial Britain, and the "Improvement" of the World*. Auténtica joya de la corona gala, el Jardín botánico de París se salvó del vendaval revolucionario de 1789. Cuatro años más tarde se transformó en Museo de Historia Natural; en la historia natural se veía la fuente indispensable de prosperidad del país y del perfeccionamiento moral del nuevo ciudadano. Antes incluso de la toma de la Bastilla, el lenguaje de la política había comenzado a incorporar términos y expresiones extraídas del mundo de la naturaleza: constitución, regeneración y corrupción, entre otros. Sin dejar de lado las clasificaciones y demás cuestiones de sistemática, llevada ésta a un punto culminante por Antoine-Laurent de Jussieu y su



Bóveda de un bosque de la isla panameña de Barro Colorado, fotografiada desde una altura de 200 metros. Ilustra la estrecha conjunción de las copas de los árboles

Enfermedades carenciales

Beriberi, white rice and vitamin B. A disease, a cause and a cure, por Kenneth J. Carpenter. University of California Press; Berkeley, 2000.

Kenneth J. Carpenter es profesor emérito de Nutrición en Berkeley, California y autor, entre otras obras, de una "Historia del escorbuto y la vitamina C". En esta ocasión presenta una investigación histórica sobre el beriberi, enfermedad carencial originada por un aporte insuficiente de vitamina B1 en la dieta y caracterizada por una progresiva debilidad de brazos y piernas, así como por trastornos cardiovasculares.

A lo largo de doce capítulos se detalla el logro de un éxito, el descubrimiento del origen de una enfermedad que se pensó limitada a ciertas zonas tropicales. Su interés se acrecentó al comprobarse que se debía a la falta de tiamina o vitamina B1, componente de sistemas enzimáticos esenciales no sólo en el hombre, sino en todo el reino animal y vegetal. Los colonizadores europeos se encontraron con la enfermedad en las Indias Orientales a comienzos del siglo XVII y durante doscientos años se pensó que su origen radicaba en un miasma presente en la zona. Con el advenimiento de la teoría microbiana, se sustituyó aquél por una bacteria, que no logró encontrarse en los afectados por el beriberi. Poco a poco se abrió paso la teoría nutricional, al observarse un predominio de arroz blanco en la dieta de estos enfermos.

Los cuarenta años siguientes, repletos de investigaciones en animales de experimentación y en el hombre, son descritos minuciosamente y permiten comprender el proceso que llevó a identificar el factor activo existente en aquello que se desechaba en la preparación del arroz como alimento, su cáscara, y que se denominó "amina vital" o vitamina. Este proceso culminó con la síntesis en el laboratorio de la vitamina B1. La intención del autor, adelantada en el prólogo, ha sido exponer con detalle los trabajos de laboratorio y de campo llevados a cabo y dejar para otros especialistas algo que se echa de menos en esta obra, el estudio de la influencia de los factores sociales y culturales en la evolución de la enfermedad. Se ofrecen multitud de datos acerca de las investigaciones realizadas, con remisiones continuas de unos capítulos a otros que a veces abruman al lector, el cual agradece el "respiro" proporcionado por los dos últimos capítulos, en los que se subrayan los principales puntos tratados y se reflexiona acerca de la aplicación práctica de los resultados obtenidos, en una sociedad que culturalmente rechazaba el consumo de un arroz que no fuera blanco, lo que obligó a enriquecer con tiamina la harina y el arroz blanco para suplir su carencia nutricional en la población.

Esta monografía constituye una buena aportación al estudio histórico del beriberi desde el campo de la nutrición y permite valorar la importancia del descubrimiento de la función bioquímica de la tiamina en la elaboración del concepto de "lesión bioquímica" ligada a un déficit vitamínico.

—María José Báguena Cervellera

Genera plantarum, aparecidos en 1789 con extensas aportaciones de nuestro Cavanilles, buscábase también el conocimiento de las propiedades de plantas familiares o exóticas.

De allegar el mayor número posible de especímenes se encargaba André Thouin, capataz del Jardín y protegido de Buffon, sin duda éste la figura más prestigiosa con su *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du Cabinet du Roi* hasta la irrupción en escena de Darwin. La correspondencia de Thouin, reseñada aquí hace unos años, refleja la solidez de una institución, que lo mismo suministraba herbarios para la docencia que mantenía un fluido intercambio de semillas con otros jardines de Francia, de Europa o del mundo. "En este momento (1788), escribe, el Jardín contiene unas 6000 especies y más de 60.000 individuos. Constituye, sin duda, la colección más nutrida de Europa."

A París miraba Joseph Banks cuando decidió convertir Kew, fundado en 1759, en el centro del trasiego botánico del imperio británico. Sostuvo una fluida correspondencia con científicos de Europa entera, de san Petersburgo a Lisboa. A través de Solander, Dryander y los Forster se relacionó con el cameralismo báltico. Se hizo con toda la bibliografía agrícola y botánica de su tiempo, desde Memorias de las instituciones hasta catálogos de especies. E intercambió semillas y especímenes con Thouin.

Si la revolución se proponía forjar hombres mejores a imagen de la naturaleza, en Kew, es la tesis de Drayton, se pretendía la "mejora" del mundo, a través del movimiento de plantas económicas entre el hemisferio occidental y el oriental, y de plantas ornamentales entre el norte y el sur. Quedaba lejos el viejo sueño renacentista de acumular todas las plantas en una suerte de jardín genesíaco recuperado, cuatripartito de acuerdo con las especies pertenecientes a los cuatro continentes entonces conocidos. En el siglo XVII los holandeses plantaron ya jardines en El Cabo, Malabar, Java, Ceylán y Brasil, que intercambiaban plantas con Amsterdam y Leyden. El reino vegetal, en toda su diversidad, no podía confinarse en ninguna hacienda, por real que fuera, al tiempo que adquiría una fuerza política decisiva.

Banks, que había sido a sus costas expedicionario del *Endeavour* con el capitán James Cook, y enviado recolectores, a cargo de la corona, a Nueva Gales del Sur, China, Brasil y el Cabo, justificaba tales misiones en provecho de Kew porque "honran a la ciencia y al país, promueven el comercio, ayudan a su población y permiten al monarca hacer regalos a otros gobernantes". Confiaba en que la agricultura autóctona, ayudada por la ciencia, sacaría a las colonias de su postración y las haría autosuficientes y prósperas.

Entre la *Histoire naturelle des oiseaux* de Buffon y el descubrimiento de la evolución de los pinzones por Darwin la historia de la





Charles-Lucien Bonaparte. Museo Napoleónico de Roma

biodiversidad le concede una página de prestigio al sobrino de Napoleón (*The Emperor of Nature. Charles-Lucien Bonaparte and His World*), un hombre sin un país, como recuerda Patricia Tyson Stroud. Nació en Francia (1803) donde también murió (1857), creció en Italia e Inglaterra, estuvo cinco años en Estados Unidos, volvió a Italia para autoexiliarse en Inglaterra y Holanda. Estudió y clasificó, el primero, las aves de América del Norte y central, Europa, Asia, Africa y Australia. Al autor de la monumental *Ornithology: or, The Natural History of Birds Inhabiting the United States not given by Wilson* se le despertó la vena naturalista con la precoz lectura del libro de Linneo sobre el sistema vegetal. El *Manuel* d'*ornithologie* de Coenraad Jacob Temminck le encauzó esa pasión hacia las aves.

En su *Ornitología* continuadora de la de Wilson se había servido del lápiz de Peale y de John James Audubon, entonces un desconocido. El cambio de una disciplina de gabinete a un trabajo de campo ahí iniciado culmina en *Conspectus generum avium* (1850). Para su confección, sumó a lo observado espléndidas colecciones de Leyden, Berlín, Londres y el Museo de Historia Natural de París.

Desde Darwin, los biólogos se atendrán a una doble observación fundamental. Primera, las comunidades naturales, dispares unas de otras, albergan especies muy diversas. Segunda, las especies muestran un buen encaje en su entorno. Diversidad y adaptación se implican en el proceso de especiación. Distinguen los naturalistas la especiación alopátrica de la especiación simpátrica; atañe aquélla a la divergencia desarrollada entre poblaciones geográficamente aisladas, en tanto que la simpátrica se produce por división de un linaje en el seno de una misma población. En realidad, la especiación alopátrica y la simpátrica son los extremos de un *continuum* definido por la cuantía de intercambio génico. Y, para lo que aquí interesa, son las fuentes últimas de biodiversidad.

A través de la complejidad (*Stability and Complexity in Model Ecosystems*) entró la diversidad en la ecología teórica, su lugar natural. Así debe entenderse esta reimpresión del texto fundacional de Robert May, con una introducción nueva. Proponía entonces (1973), frente al pensamiento dominante, que los ecosistemas complejos no conducían, por sí mismos, a la estabilidad de las poblaciones. Idea que asentaba en modelos matemáticos no lineales y en la aceptación del caos determinista en ecología. Partía del carácter dinámico de los sistemas constituidos por las poblaciones, que crecen por procesos discretos y se regulan por mecanismos de retroalimentación.

Sabido es que, en un entorno particular, allí donde se registra mayor diversidad se mide también la mayor productividad primaria. La diversidad estabiliza la comunidad y los procesos del ecosistema, pero al propio tiempo desestabiliza la dinámica de las poblaciones. Ahora bien, ¿por qué hay más especies en un lugar que en otro? Para May la diversidad es fruto de la tensión que sufren los ecosistemas entre las fuerzas evolutivas (que tienden a añadir especies, a explotar o subdividir cada nicho disponible) y las consideraciones dinámicas (un creciente número de especies comporta ma-

yor fragilidad dinámica), para concluir que la biodiversidad de una comunidad guarda relación con la predictibilidad de su entorno y no con la productividad total.

Sobre dinámica de la diversidad apareció hace tres años un conjunto bien trabado de artículos compilados en homenaje a Michael L. Rosenzweig y James H. Brown, pioneros del estudio de los procesos ecológicos de macroescala, espacial y temporal (*Biodiversity Dynamics. Turnover of Populations, Taxa, and Communities*). Se trata de un elenco con predominio de los enfoques pluridisciplinares, pues el remplazo o recambio de especies a lo largo de la evolución requiere el concurso de datos recabados de la biología de poblaciones, biología comparada, ecología y paleontología.

Importa no sólo el recambio de especies, sino también el de comunidades y ecosistemas. Para abordar el primero, se impone desentrañar la relación entre el dominio geográfico y las tasas de diversificación y extinción, entre filogénesis y evolución de la complejidad. Se ha de trascender la visión ahistórica de microescala espaciotemporal del ecólogo y la perspectiva cerradamente histórica de macroescala del paleontólogo; si queremos comprender la biodiversidad, necesitamos conjugar la dinámica general con los episodios contingentes. En ambas escalas los procesos que controlan la diversidad son la especiación y la extinción.

Extinción y especiación (o colonización) suelen ir inextricablemente unidas, favorecidas ambas por cambios ambientales. Al eliminar las especies obstaculizadoras, la extinción en masa precede a grandes episodios de especiación. Además de ese factor extrínseco, existe una correlación intrínseca, biótica; los grupos con tasas elevadas de especiación tienden a mostrar tasas elevadas de extinción. Lo que no empece que las especies raras tengan tasas de extinción mayores, y tasas de diversificación menores, que las especies abundantes. Las tasas máximas de especiación se producen en niveles intermedios de perturbación; cuando ésta se intensifica y se hace extrema, se provoca la extinción, pero si la alteración apenas se nota no se crearán los estímulos ambientales que promueven la selección natural.

Si de las especies nos elevamos al clado, la diversificación en el llamado espacio de estados (es decir, cualquier rasgo de la especie, como tamaño, distribución geográfica o complejidad) opera de un modo distinto según la consideremos a micro o macroescala. Un ejemplo clásico de diversificación de clado es la evolución del tamaño corporal; de acuerdo con el modelo de adaptación energética potencial, el tamaño máximo corporal de un clado reflejará el tamaño óptimo para la conversión idónea de recursos energéticos en progenie.

Muchas son las teorías generales que se proponen dar una explicación coherente de la biodiversidad. Stephen P. Hubbell ofrece la suya en *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. En

Astrofísica básica

GALAXIES IN THE UNIVERSE. AN INTRODUCTION, por Linda S. Sparke y John S. Gallagher. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

La publicación de un nuevo libro de texto de astrofísica es siempre un acontecimiento que los astrónomos celebramos con alegría. Particular satisfacción merece la publicación de *Galaxies in the Universe*, tanto por su contenido como por lo cuidado de la edición realizada por Cambridge University Press. En un libro de estas características, dirigido a estudiantes de los últimos cursos de licenciatura de ciencias físicas, es muy importante que la exposición sea accesible y clara, requisito que se cumple sobradamente en este caso. Las ilustraciones, aunque en blanco y negro, son muy numerosas e informativas. Además, los diferentes temas son abordados aquí no sólo con un buen nivel académico, lo que conlleva un cierto aparato matemático, sino que se cuida un enfoque muy actual. Ello se debe a que los autores, además de profesores, son activos investigadores en el campo de la astrofísica extragaláctica.

Habitualmente los cursos que versan específicamente sobre galaxias se imparten tras algún curso previo de astrofísica general y estelar. El libro incluye una detallada introducción en la que el lector puede adquirir los conocimientos esenciales sobre física estelar, la Vía Láctea y otros aspectos básicos, que son necesarios para poder estudiar el texto con aprovechamiento. A continuación se describen los aspectos observacionales de nuestra galaxia, incluyendo una bonita descripción de la rotación galáctica. El siguiente capítulo expone la teoría de las órbitas estelares en un potencial galáctico, tema de gran interés en el estudio de galaxias barradas y de galaxias activas.

En capítulos sucesivos se describen el Grupo Local, las galaxias espirales, las de disco y las elípticas. Los dos últimos capítulos se consagran a la distribución a gran escala de las galaxias (cúmulos y vacíos), a los núcleos activos y a las galaxias más jóvenes. El libro se cierra con una estimulante discusión sobre la formación de las galaxias. Se incluyen 163 ejercicios muy bien planteados para que el estudiante realice estimaciones de órdenes de magnitud, o para que amplíe determinados puntos. En resumen, un espléndido texto que servirá tanto para los que quieran tener un buen conocimiento general de las galaxias, como para aquellos que deseen adentrarse en su estudio de una manera profesional. En este último caso el libro servirá como una excelente introducción a los clásicos *Galactic Dynamics* de Binney y Tremaine y *Galactic Astronomy* de Merrifield y Tremaine, o a artículos de revista y puesta a punto desde los que el investigador podrá saltar a las publicaciones más especializadas del campo.

—Rafael Bachiller



Meleagris gallopavo, macho y hembra, dibujados por Titian R. Peale, 1825

su vinculación con la biogeografía retoma el trabajo de Robert H. MacArthur y Edward O. Wilson. En su teoría neutralista Hubbell formaliza matemáticamente la unificación de los dos campos, la biogeografía (estudio de la distribución geográfica de las especies) y la biodiversidad (que él asocia a la cuantía de especies en un espacio y tiempo dados).

Es la suya, acota, una teoría de la diversidad dentro del nivel trófico, con comunidades integradas por especies simpátricas, verbigracia, el zooplancton que se alimenta del fitoplancton de un lago. En cuanto neutralista, las comunidades se suponen estructuradas por deriva, migración y especiación; con otras palabras, los organismos componentes presentan idénticas probabilidades cada uno de engendrar, morir, migrar e iniciar una especiación. A la manera de la deriva en genética de poblaciones, la deriva ecológica cumple una función central en la dinámica de las comunidades. Con la incorporación de la especiación en la teoría de la biogeografía de islas, la teoría neutralista se dota de capacidad para predecir la abundancia relativa de especies desde escalas biogeográficas locales hasta globales.

De la teoría a la práctica. Los arrecifes (*Reef Evolution*) y la vegetación (*Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen*) son los representantes por antonomasia de la biodiversidad en medios marinos y continentales, respectivamente. Los arrecifes, un fenómeno natural extraordinario, forman las mayores estructuras levantadas por la acción de los organismos. Aunque ocupan sólo una fracción pequeña de los océanos (0,2 %), su persistencia (el 70 % está amenazado) interesa a la biosfera entera. Permiten el desarrollo de cuencas someras con manglares, protegen de la erosión a las líneas costeras, regulan el carbono atmosférico y, sobre todo, encierran una capacidad única para generar y mantener la biodiversidad.

Viven en su seno comunidades altamente especializadas, con sutiles interrelaciones caracterizadas por la simbiosis generalizada y reguladas por una intensa actividad depredadora. La asociación fotosimbiótica de los corales con las algas, en particular, soporta la estructura física del arrecife, en cuyo tinglado cavernoso se alojan miles de especies, muchas de las cuales exclusivas de tales ecosistemas. La creación del arrecife depende de múltiples fenómenos orgánicos e inorgánicos (biomineralización para formar esqueletos calcáreos, decantación de granos sedimentarios por desintegración y destrucción del esqueleto, espesamiento del sedimento por los organismos, precipitación de cemento carbonatado y micrita). Allí las asociaciones dentro de las comunidades, muy frágiles, cambian con suma facilidad, dado el grado intenso de competencia, depredación, parasitismo y mutualismo reinantes.

La flora y vegetación mediterráneas ocupan una gran parte de los países del Maghreb, Sahara excluido, es decir, unos 700.000 kilómetros cuadrados. Sus ríos, desemboquen en el Atlántico o el Mediterráneo, se secan a menudo en la estación estival. Las tormentas cataclísmicas aceleran los procesos erosivos de los suelos. Con lluvias centradas en las estaciones frías y una sequía que persiste de 2 a 8 meses por año, las precipitaciones son extremadamente variables e irregulares y dan origen a diversos bioclimas. Desempeñan éstos un papel decisivo en la organización de las estructuras de la vegetación. Un papel que comparten con los factores antrópicos.

El rápido crecimiento de las poblaciones, sobre todo rurales, ha determinado una transformación radical de la utilización del medio por el hombre y sus rebaños. La deforestación, desmatorralización, clareos anárquicos, roturaciones incontroladas y sobrepastoreo han perturbado profundamente los equilibrios ecológicos que existían todavía hace una veintena de años. Las superficies forestales retroceden en promedio de un 1 a un 3 % cada año.

Con sus 25.000 especies, la región mediterránea representa una de las regiones del globo más ricas. Su proporción de endemismos alcanza el 50 %, consecuencia directa de una larguísima y accidentada historia. Africa del Norte que constituye sólo una parte del mundo mediterráneo (en torno al 15 %) posee unas 5200 especies, de las que unas 1250 serían endémicas. Destacan los terófitos. En el conjunto del Maghreb hay 148 familias. De ellas dos poseen más de 100 géneros: Poáceas y Asteráceas; otras dos tienen más de cincuenta: Crucíferas y Umbelíferas; cinco familias más de 20 géneros: Leguminosas, Cariofiláceas, Borragináceas y Liliáceas.

—LUIS ALONSO